

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Tvářecí parametry trubkových oblouků

Forming Parameters of Tube Bends

Student:

Bc. Jiří Juříček

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Jiří Juříček

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2303T002 Strojírenská technologie

Téma:

Tvářecí parametry trubkových oblouků
Forming Parameters of Tube Bends

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor technologií výroby trubkových oblouků velkých rozměrů.
2. Analýza tepelně mechanických paramterů ohybových procesů.
3. Stanovení základních vektorů sil působících v ohybovém zařazení
4. Provedení analýza pro materiálové reprezentanty různých legovacích konceptů.
5. Diskuze dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

HENZEL, A., SPITTEL, T. *Rasčet energosilovych parametrov v processach obrabotki metallov davleniem.* Moskva: METALLURGIA, 1982. s. 73
BÁLEK, S. *Tepelně technické tabulky a diagramy.* Ostrava: VŠB, 1979, 137 s.
ČABELKA, J. a kol. *Mechanická technológia.* Bratislava: VSAV, 1967. s. 594÷599
STANGE, R. *Basic tube bending guide.* Denver: Tool for bending, Inc., 1963. p. 10
SEMIATIN, S. L. a kol. *Metals Handbook Ninth Edition. Vol. 14, Forming and Forging.* Ohio, Metals Park: ASM International, 1998, p. 665÷674


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011

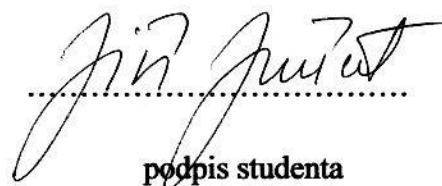



prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

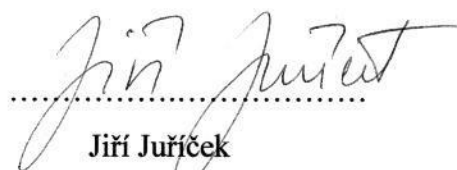
V Ostravě 20.5.2011


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu s její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je v takovém případě oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20.5.2011



Jiří Juříček

A.Gavlase 38/14

700 30 Ostrava – Jih

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

JUŘÍČEK, J. *Tvářecí parametry trubkových oblouků: diplomová práce*. Ostrava: katedra mechanické technologie, Fakulta strojní, VŠB Technická univerzita Ostrava, 2011, 60s. Diplomová práce, vedoucí Hrubý, J.

Tato práce se zabývá úpravou tvářecích parametrů při výrobě trubkových oblouků. Jde o trubky velkých rozměrů, ohýbané za tepla. Obsahuje rozbor tepelně mechanických parametrů, sil působících v ohýbacím zařízení a vyhodnocení jejich vlivu na průběh celého procesu. Cílem práce je upřesnit stávající technologii ohybu za tepla tak, aby byly minimalizovány nežádoucí průvodní jevy a dodržena požadovaná odchylka kruhovitosti průřezu po dokončení ohybu.

ANNOTATION OF THESIS

JUŘÍČEK, J. *Forming Parametres of Tube Bends: Master Thesis*. Ostrava: Department of Mechanical Technology, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2011, 60 p. Thesis, head: Hrubý, J.

This study describes the modification of forming parameters of tube bending. Specifically, it discusses the bending of large diameter steel pipes using local heat and cooling and includes the analysis of thermo-mechanical parameters. It also discusses the different forces used in bending tools and evaluates their influences on work flow. The main objective of the study is to specify the existing technology for heat bending and to minimize any adverse side effects in order to maintain the shape tolerances in cross-sections of the tube after the bending is finalized.

Obsah

Seznam použitého značení	7
1 Úvod	9
2 Rozbor technologií výroby trubkových oblouků velkých rozměrů	10
2.1 Ohyb pouze pomocí ohybového momentu.....	11
2.2 Ohýbání tlačné.....	11
2.3 Zakružování.....	12
2.4 Kompresní ohyb	13
2.5 Rotační tažné ohýbání	14
2.6 Rotační tažné ohýbání s trnem	17
2.7 Záhybové ohýbání	26
2.8 Ohyb při středofrekvenčním indukčním ohřevu	26
2.9 Ohyb pomocí ozáření laserem.....	29
3 Analýza tepelně mechanických parametrů ohybových procesů	31
4 Stanovení základních vektorů sil působících v ohybovém zařízení	38
5 Provedení analýzy pro materiálové reprezentanty různých legovacích konceptů.....	42
5.1 Konstitutivní matice	43
5.2 Prostorový model	44
5.3 Analýza pro vybraný materiálový reprezentant	45
5.4 Silové parametry při ohybu	48
6 Diskuze dosažených výsledků	52
7 Použité zdroje	53
8 Přílohy.....	55

Seznam použitého značení

Označení	Název	Jednotka
A	Tažnost	%
A_{1,2,3}	Materiálové konstanty	-
C	Součinitel pevnosti	Pa
CLR	Střední poloměr ohybu trubky	m
D	Vnější průměr trubky	m
D_k	Průměr kladky	m
E	Modul pružnosti materiálu v tahu	Pa
F_A	Reakce na tlačné zařízení	N
F_B	Reakce na vodící kladce	N
F_C	Reakce na ohýbací kladce	N
I	Moment setrvačnosti trubky	m ⁴
J	Moment setrvačnosti prstence	m ⁴
KV	Nárazová práce	J
L	Délka ramene kladky	m
M_o	Ohybový moment	Nm
R	Poloměr ohybu trubky	m
R_e	Mez kluzu	Pa
R_m	Mez pevnosti	Pa
R_{min}	Minimální poloměr ohybu trubky	m
R_n	Poloměr nastavení	m
T	Teplota	°C
T_{tav}	Teplota tavení	°C
W_o	Ohybový modul v průřezu	m ³
a₁	Vzdálenost induktoru od vodící kladky	m
a₂	Vzdálenost ohýbací a vodící kladky	m
d	Vnitřní průměr trubky	m
k	Koeficient průřezu	-
l	Délka přitlačné lišty	m
m	Součinitel vlivu deformační rychlosti	-
m_{1,2,3}	Materiálové konstanty	-
n	Exponent deformačního zpevnění	-

o	Odchylka kruhovitosti	%
š	Šířka ohřátého pruhu trubky	m
š_{1,2}	Změny šířky ohřátého pruhu trubky na okrajích	m
t	Tloušťka stěny trubky	m
y	Vyložení ohýbací kladky	m
α	Úhel ohybu trubky	°
λ	Tepelná vodivost	Wm ⁻¹ K ⁻¹
ε	Deformace	-
ε̇	Rychlost deformace	s ⁻¹
π	Ludolfovo číslo	-
ρ	Hustota	kg.m ⁻³
σ_c	Mez únavy při střídavém tahu - tlaku	Pa
σ_{co}	Mez únavy při střídavém ohybu	Pa
σ_p	Přetvárný odpor	Pa
τ_{ck}	Mez únavy při střídavém krutu	Pa

1 Úvod

Tato práce je zaměřena na tvářecí parametry při výrobě trubkových oblouků. Na trubky obecně lze pohlížet jako na polotovary, nebo konstrukční materiál. Jejich uplatnění je proto velmi široké. Můžeme se s nimi setkat v kosmu stejně jako na dnech oceánů. Na zemi jsou používány ve všech oblastech průmyslu, např. při výrobě kotlů, motorů, výměníků tepla, klimatizačních zařízení atp., především však v energetice a chemii k dopravě produktů či jako duté profily ve stavebnictví. S ohledem na tuto rozmanitost použití patří výroba oblouků mezi základní operace s trubkami.

Východiskem pro tuto práci je provozní situace vzniklá po aplikaci analytických výpočtů na proces ohýbání trub velkých průměrů, která nedává zcela uspokojivé výsledky. Především se jedná o deformace v místě opěru vodící klady, vedoucím až ke zborcení profilu trubky, chyby odchylky kruhovitosti průřezu přesahující povolenou procentuální odchylku či nerovnoměrný výsledný poloměr oblouku.

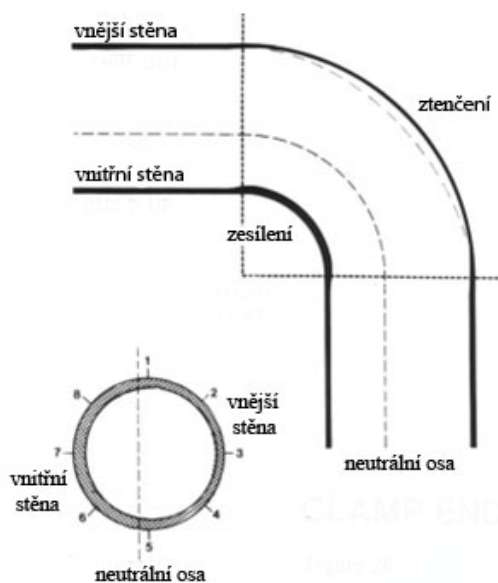
Pro řešení dané situace byl jako modelový příklad vybrán reprezentant TR KR 377x16 ČSN 42 5715 z nelegované konstrukční oceli ČSN 11 523.0 (S355J0 dle EN 10027-1). Pro něj byl postaven geometrický model celého procesu. Následně byla provedena MKP analýza včetně simulace indukčního ohřevu s následným ochlazením za pomoci software QForm 2D/3D firmy QuantorForm Ltd. [14]. Jejím výsledkem jsou hodnoty termomechanických veličin a silových reakcí (především náběhových maxim) působících během procesu celého ohybu, umožňující vhodně korigovat stávající nastavení procesu.

Cílem této práce je stanovení hodnot a parametrů, jejichž aplikace povede k omezení nežádoucích vedlejších účinků procesu ohybu, vzniklých jako důsledek idealizace či zjednodušení vztahů z materiálových veličin při analytických výpočtech.

Očekávaný přínos navržené inovace spočívá ve zpřesnění procesu výroby, snížení energetické náročnosti a v konečném důsledku tedy i příznivějšího ekonomického zhodnocení celého procesu.

2 Rozbor technologií výroby trubkových oblouků velkých rozměrů

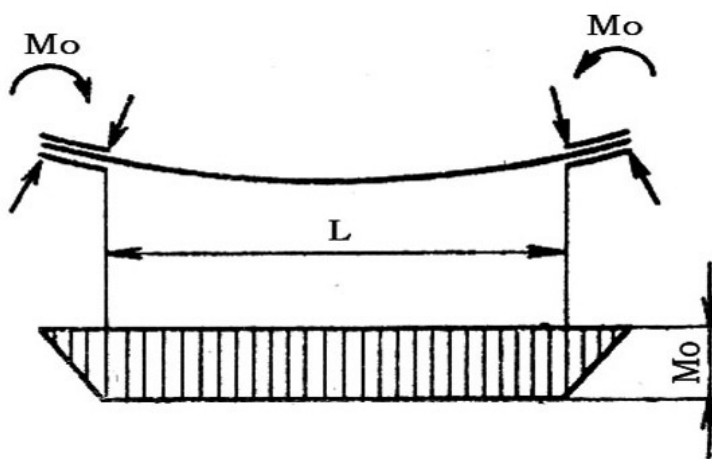
Ohyby trubek můžeme rozdělovat podle různých parametrů, např. podle teploty na ohyby za tepla a za studena, nebo podle stupně automatizace na ohýbání ruční, poloautomatické a CNC. Lze také rozlišovat ohyby na rovinné a prostorové či podle použitých technologií. Všechny mají své výhody, nevýhody a limity použití, dané především materiálem použité trubky, jejím vnějším průměrem, tloušťkou stěny, poloměrem ohybu a požadovanou kvalitou ohybu (odchylkou kruhovitosti a ztenčením stěny). A pro všechny je také společné, že během ohybu dochází ke dvěma základním jevům. Na vnější straně trubky dochází ke ztenčení stěny, popř. jejímu hroucení dovnitř a na straně vnitřní k nahuštění materiálu a zvrásnění. Toto jsou okolnosti, se kterými se musí potýkat všechny technologie používané pro ohýbání trubek. Mezi nejčastěji používané metody patří ohýbání tlačné, tažné, vytlačováním a rotační.



Obr. 1 – Reakce trubky na ohyb

2.1 Ohyb pouze pomocí ohybového momentu

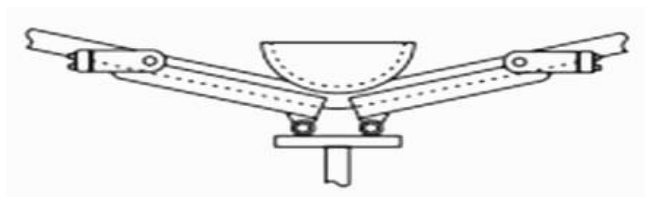
Jde o způsob ohybu, při němž se pro vytvoření oblouku nepoužívají síly kolmé k ose ohýbané trubky. Ohybový moment je až do meze kluzu konstantní a poloměr ohybu je rovnoměrný [19]. Po jeho překročení se však začnou projevovat různé vady materiálu, vedoucí od zplošťování průřezu až k jeho zborcení. Používá se proto především pro ohyb velkých trub s malým zakřivením.



Obr. 2 – Ohýbání pouhým momentem

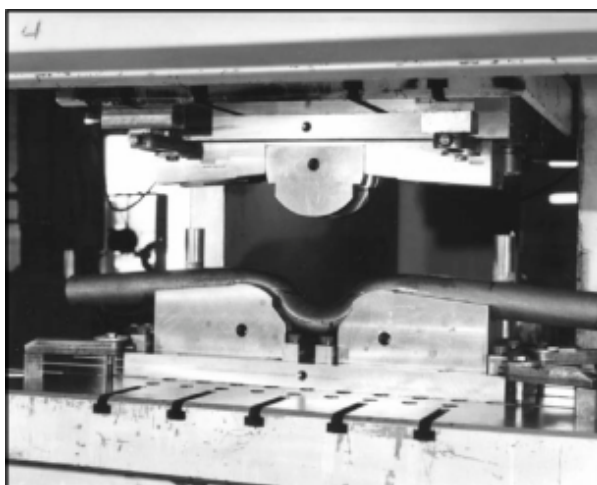
2.2 Ohýbání tlačné

Jedná se o základní a zároveň i nejrozšířenější ohýbací metodu. Probíhá tak, že tlačná čelist je tlačena dolů proti dvěma pohyblivým čelistem, které trubku kolem tlačné čelisti ohnou [16]. Ohybový moment je zde rozložen nerovnoměrně, od maxima pod ohýbací silou až k nule.



Obr. 3 – Tlačné ohýbání

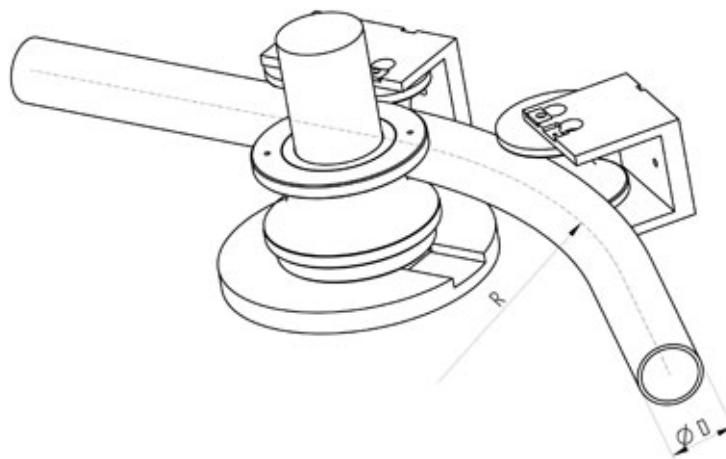
Provádí se zpravidla na lisech a lze ohýbat i více trubek najednou. Tvar nástrojů je závislý na počtu prováděných ohybů. Pro kusovou a malosériovou výrobu se používá čelist s jednou drážkou, pro větší četnost produkce pak mívá drážek více [18]. K oblíbenosti metody přispívá i její nízká cena.



Obr. 4 – Tlačné ohýbání na lisu

2.3 Zakružování

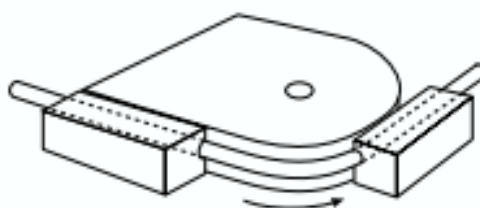
Tato metoda je vhodná pro velké poloměry ohybu. Provádí se třemi, popř. vícero kladkami, mezi něž je trubka během ohybu vtahována, nebo vtlačována. Ohybový moment je vyvolán silami kolmými k ose trubky, měnícími vzhledem k ohýbané trubce své působíště [19]. Kromě ohybového momentu je možno využít i moment kroutící, čímž jsou umožněny i ohyby trubek ve spirále. Ohýbat je možno kromě trubek také duté a tvarové profily.



Obr. 5 – Ohýbání zakružováním

2.4 *Kompresní ohyb*

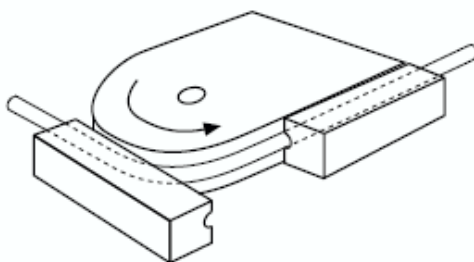
Ohyb probíhá tak, že nejprve je trubka přichycena přitlačnou lištou k pevné matrici a pak je uvedena do chodu ohýbací čelist. Tím jak ohýbací čelist rotuje kolem pevné matrice, ohýbá trubku dle zaoblení matrice. Složitost celého procesu se liší v závislosti na ohýbané trubce (poměru stěny k vnějšímu průměru trubky) a poloměru ohybu. Pro zamezení borcení průřezu ohýbané trubky a otlaků od nástrojů se žlábký pro trubku nedělají s přesně kruhovým zaoblením, ale spíše srdcového či mnohoúhelníkového tvaru [18].



Obr. 6 – Kompresní ohyb

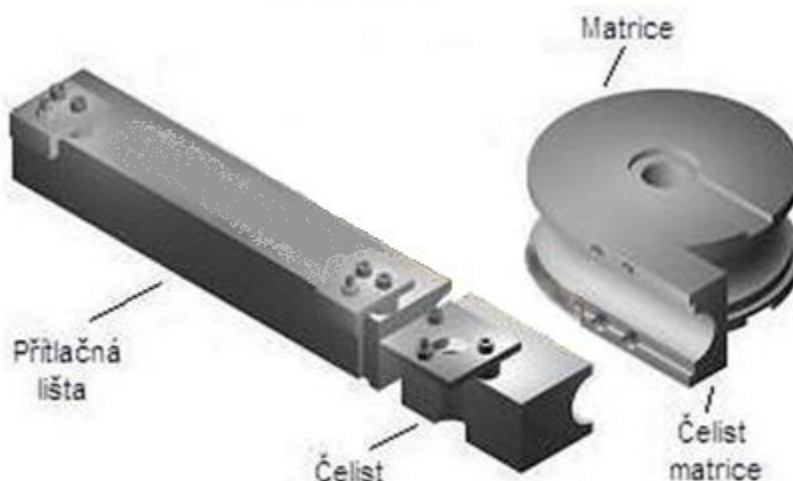
2.5 Rotační tažné ohýbání

Jedná se o nejuniverzálnější a nejpřesnější metodu ohybu trubek, kdy lze snadno ohýbat oblouky malého poloměru a to i z trubek s tenkou stěnou.



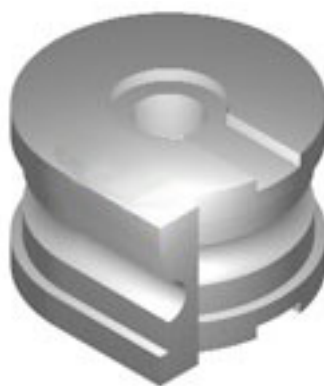
Obr. 7 – Rotační tažné ohýbání

Pro rotační ohýbání trubek stačí pouze matrice, kolem které se ohyb provádí, čelist, jež drží trubku při otáčení kolem matrice a přitlačnou lištu, která přitlačuje a následuje trubku během ohýbání [18]. Ohyb probíhá postupně, přičemž síly kolmé k ose trubky mění vzhledem k trubce svá působíště. Navíc působí ještě i osové síly vzniklé třením trnu a přitlačné lišty, vytvářející přídatný tah. Jedná se o nejpoužívanější způsob ohýbání pro ohyby do 180° za studena.



Obr. 8 – Základní sestava pro rotační ohyb

Matrice je základním nástrojem, který určuje poloměr ohybu trubky. Vyrábí se z nástrojové oceli či slitiny a tepelně zpracovává nebo nitriduje, což závisí na konkrétních požadavcích [11]. Konkrétní volba typu matrice záleží vždy na průměru trubky, poloměru ohybu a také na použité ohýbačce. Dalším prvkem, který ovlivňuje kvalitu ohybu, je délka a povrch čelisti matrice. Povrchová úprava čelisti matrice závisí na konkrétním užití, používá se pískování, karbidový nástřík, nebo vroubkování.



Obr. 9 – Matrice



Obr. 10 – Matrice s vroubkováním

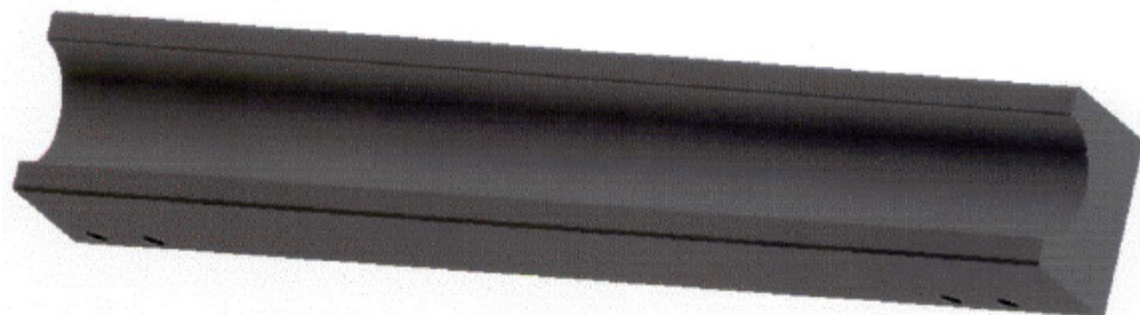
Čelist má stejnou délku i povrchovou úpravu jako čelist matrice a její hlavní funkcí je přidržovat trubku během celého ohybu bezpečně přitlačenou k čelisti matrice [18].



Obr. 11 – Čelist

Přítlačná lišta slouží k vyvinutí stálého tlaku na trubku v tangenci (funkčním bodě), kde vzniká ohyb. Je konstruována tak, aby následovala trubku po celou dobu, kdy je ohýbána. Délka přítlačné lišty pak závisí na stupni ohybu ohýbané části. Její minimální délka se určí ze vztahu:

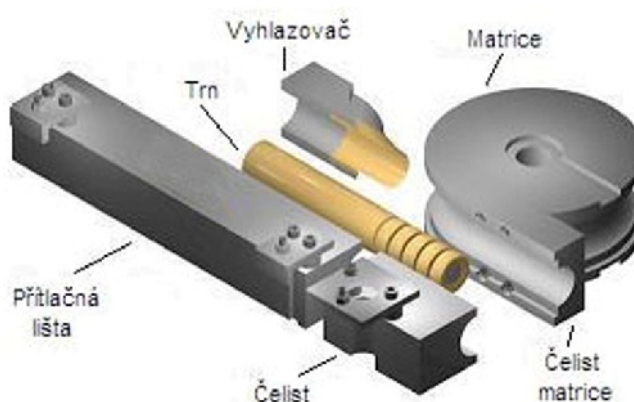
$$l = \frac{2 \cdot CLR \cdot 3,14}{2} + 2 \cdot OD \quad [11] \quad (1)$$



Obr. 12 – Přítlačná lišta

2.6 Rotační tažné ohýbání s trnem

Pro ohýbání tenkostěnných trubek a menších poloměrů ohybu potřebujeme navíc ještě trn a vyhlazovač. Trn minimalizuje zborcení profilu trubky a vyhlazovač zabraňuje zvrásnění trubky na vnitřní straně ohybu.



Obr. 13 – Sestava pro rotační ohyb s trnem

To, zda je třeba trn použít, závisí na ohýbané trubce (poměr vnějšího průměru trubky a tloušťky její stěny) a ohybovém poměru (poloměru ohybu R / CLR) [11].

Trny musejí pracovat podobně jako lidské zápěstí a jejich jednotlivé části pak jako články prstů. Vývoj trnů prodělal dlouhou cestu od přechování suchým pískem přes kabelové trny s vloženými talířovými segmenty až k univerzálním ocelovým trnům s články nejrůznějších tvarů.



Obr. 14 – Trn

Ještě mnohem důležitější, než pro ohyby trubek, jsou trny pro ohyby nekruhových profilů. Při ohýbání čtvercových, hexagonálních či osmihranných profilů je jejich použití při naprosté většině ohybů nezbytné. Je-li poloměr ohybu menší, nebo stěna trubky tenčí, je třeba použít kuličkový trn a vyhlazovač.

Naprostá většina trnů je vyráběna z ocele a zakalena na tvrdost 55 - 60 HRC [16]. Pro ohyby trubek z nerezových ocelí jsou trny vyrobeny z leštěných hliníkových bronzů (AMPCO), snižujících tření a zamezujících vzniku nežádoucích otlaků. Životnost některých trnů lze také prodloužit úpravou jejich povrchu chromováním, přičemž vrstva by se měla pohybovat v rozmezí 0,008 až 0,013 mm [16]. Jde především o trny používané pro ohyb trubek z neželezných materiálů, jako např. hliník, měď atp. Vrstvu je možné v případě opotřebení samozřejmě obnovovat.

Existuje 5 základních typů trnu [11]:

- **Jednoduchý trn** - používá se pro silnostěnné trubky a velké poloměry ohybu.



Obr. 15 – Jednoduchý trn

- **Jednoduchý tvarovaný trn** – používá se pro silnostěnné trubky s malým poloměrem ohybu. Je stejný jako jednoduchý trn, ale s tvarovaným koncem tak aby přesně kopíroval poloměr ohybu a poskytoval větší oporu uvnitř trubky.

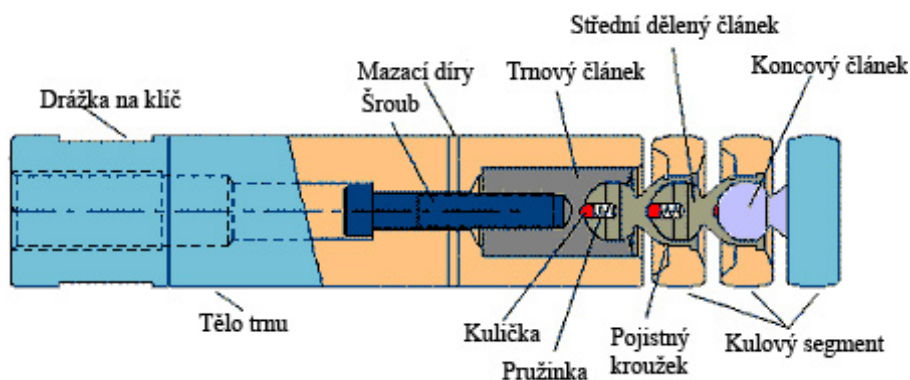


Obr. 16 – Jednoduchý tvarovaný trn

- **Standardní (článekový) trn** - používá se pro standardní sílu stěny a poloměr ohybu. Kuličkový trn je tvarován jako tažný a článekový slouží k zamezení zborcení trubky poté, co ji opustí dřík trnu. Jednočlánekové trny se používají pro ohyb trubek s vnějším průměrem do 32 mm. Těla a kuličky jednočlánekových trnů, používaných pro většinu ohybů jsou zhotoveny z nízkouhlíkové oceli, kaleny a leštěny. Ohyby s poměrem D/t více než 40 vždy vyžadují vícečlánekový trn [16].



Obr. 17 – Standardní (článekový) trn



Obr. 18 – Jednotlivé části trnu

- **Tenkostěnný trn** - používá se pro tenkostěnné trubky a menší poloměry ohybu. Má stejný typ spojovacích segmentů jako standardní trny, ovšem o jednu velikost menší, než články u standardních trnů.



Obr. 19 – Tenkostěnný trn

- **Ultra tenkostěnný trn** - používá se pro velmi malé poloměry ohybu u trubek s velmi malou tloušťkou stěny. Typ spojovacích článků je stejný jako u jako standardních trnů, velikost je ale menší.



Obr. 20 – Ultra tenkostěnný trn

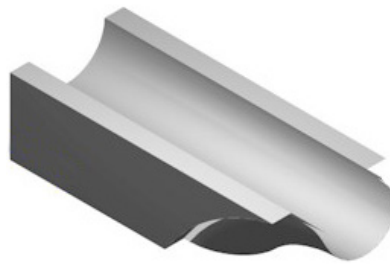
Trubky velkých průměrů se běžně ohýbají za tepla a místo trnu je používána výplň ze suchého písku. Tato metoda patří mezi nejstarší, stále se však používá. Její nevýhodou je zvýšená prašnost a hlučnost. Sestává se z přípravy, kdy je třeba trubku očistit, zbavit mastnoty a vysušit. Poté se rozměří podle prováděného ohybu a z jedné strany zazátkuje. Používají se ocelové zátky, které se buď dále utěsňují, nebo se na několika místech přivaří přímo k trubce. Dalším krokem je plnění trubky pískem. Používá se křemičitý písek zrnitosti 3 – 4, který se tolik nepřipěká ke stěně. Musí být řádně vysušený (vlhkost pod 0,3 %) a obsah příměsí nesmí překročit 15 %. Po naplnění (často již během plnění) nastává dusání písku naklepáním po obvodu trubky, nebo strásáním vibracemi. Pak se zazátkuje i druhý konec trubky a začíná ohřev [18]. Teplota se liší podle materiálu, z něž je trubka vyrobena. Po jejím dosažení nastává samotné ohýbání, které se provádí pomocí ocelových špalků na deskách pevně zakotvených v zemi, nebo otočných stolech. Síla potřebná k ohybu se vyvozuje tahem lana přes kladky. Minimální poloměr ohybu trubky je možno stanovit ze vztahu:

$$R_{\min} = \frac{0,165 \cdot D^2}{t} \quad (2)$$

Kromě trnů je při tomto způsobu ohybu často také třeba použít tzv. vyhlazovače. Používají se při malých poloměrech zaoblení a tenkých stěnách trubky. Při ohybu je na vnitřní straně trubky tlak natolik intenzivní, že materiál je vytlačován zpět a dochází ke vzniku zvrásnění. Proto je třeba tuto oblast vypodložit a to je primární účel vyhlazovače. Nedokáže vyhladit již vytvořené záhyby, může se jim pouze snažit předcházet. Upevňuje se do drážky matrice a to do blízkosti funkčního bodu (tangenty). Pro životnost

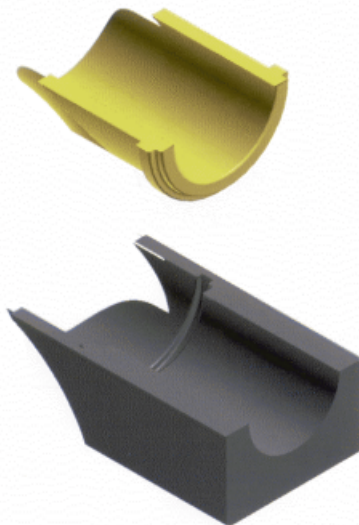
vyhlazovače (i kvalitu ohybů) je nejdůležitější jeho správné nastavení, tj. především nastavení polohy jeho špičky. Vyhlažovač není možno umístit až do bodu ohybu, protože výsledkem ohybu by byla i ulomená špička vyhlazovače. Důležitým faktorem pro jeho správné fungování je rovněž materiál, z kterého je vyroben. Pro nerezové, inconelové a titanové trubky se užívají vyhlazovače ze slitiny AMPCO (ložiskové bronzy) [11]. Pro ohýbání trubek z hliníku, mědi a měkké oceli se používají vyhlazovače ocelové, z nástrojové oceli kalené na 55 – 60 HRC. Aby se zmenšilo tření mezi vyhlazovačem a trubicí, mohou být ocelové vyhlazovače pochromovány. Dle použití rozlišujeme několik typů vyhlazovačů:

- **Standardní čtvercový vyhlazovač** - používá se pro vysoce kvalitní ohyby, kde je důležitá jeho pevnost.



Obr. 21 – Čtvercový vyhlazovač

- **Vkládané vyhlazovače** s výměnnou vložkou - užívají se hlavně v automobilovém průmyslu s velkým objemem produkce.



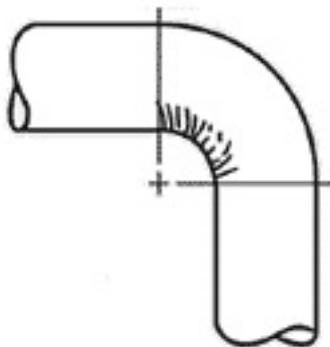
Obr. 22 – Vkládaný vyhlazovač s bronzovou vložkou

Dalším důležitým aspektem pro vytváření kvalitních ohybů je rovněž dobré mazání. Mazání se dodává v několika různých formách, jako jsou oleje, tuky, a pasty. Druh použitého mazání závisí na materiálu trubky, jež se má ohýbat. Je odlišný pro železné a neželezné kovy. S ohledem na ekologické dopady se opouštějí maziva obsahující chloridy a sulfidy a jsou nahrazována novými lubrikanty založenými na vodní bázi či obsahující např. teflon. Dostatečné množství maziva je třeba aplikovat na trn a vnitřní stranu trubky, ale je třeba učinit opatření, aby se zamezilo jakémukoliv mazání v ohybu matrice a upínací čelisti. Množství použitého maziva má velmi výrazný podíl na kvalitě provedeného ohybu.

Přes veškerou snahu se při ohýbání mohou vyskytnout chyby, především při počátečním nastavování nástrojů, nebo proto, že materiál trubky prostě nemá dostatečné ohybové a tažné vlastnosti. Mezi nejčastější vady patří [17]:

- **Zvrásnění v oblasti ohybu**

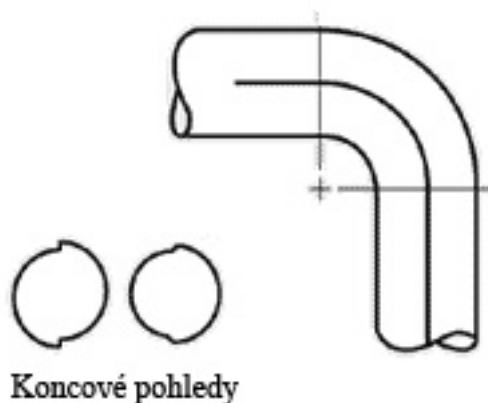
Bývá způsobeno prokluzováním trubky v čelistech, malým trnem nebo jeho nedostatečným vysunutím za bod ohybu, popř. nedostatečným tlakem na přítlačné liště.



Obr. 23 – Zvrásnění trubky

- **Otlaky v ose ohybu trubky**

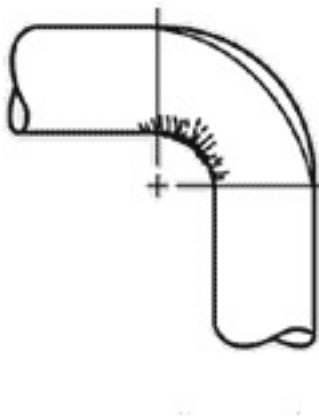
Vznikají špatným vertikálním nastavením čelisti a přítlačné lišty, nebo přítomností nečistot na nástroji či ohýbané trubce.



Obr. 24 – Otlaky v ose ohybu

- **Zborcení profilu trubky**

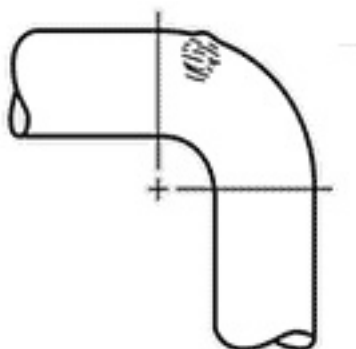
Může být doprovázeno i zvrásněním na vnitřní straně ohýbané trubky. Vzniká nedostatečným zasunutím trnu do trubky, nebo použitím trnu s malým počtem článků.



Obr. 25 – Zborcení profilu trubky se zvrásněním

- **Vyboulení na konci ohýbané oblasti**

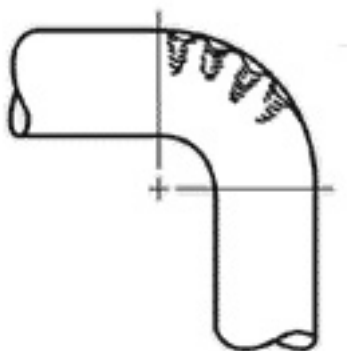
Je způsobeno přílišným zasunutím trnu do trubky a zároveň nadměrným tlakem přitlačné lišty.



Obr. 26 – Vyboulení na konci ohýbané oblasti

- **Vyboulení způsobené články trnu**

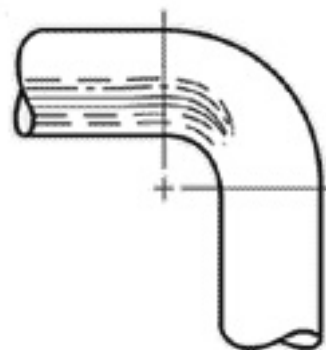
Nejčastějšími příčinami jsou nevhodný typ trnu a materiálové vlastnosti trubky.



Obr. 27 – Vyboulení způsobené články trnu

- **Rýhy a otlaky nástrojů v oblasti ohybu a vyhlazovače**

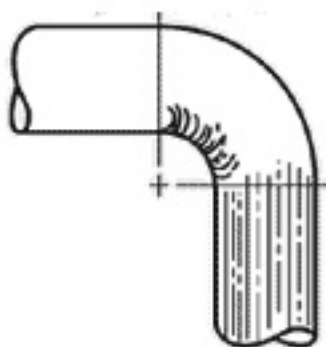
Vznikají špatným nastavením čelisti, tlaky ve všech nástrojích, špatnou velikostí trnu či nevhodným mazivem.



Obr. 28 – Rýhy a otlaky nástrojů

- **Zvrásnění v ohybu a rýhy v oblasti uchycení trubky**

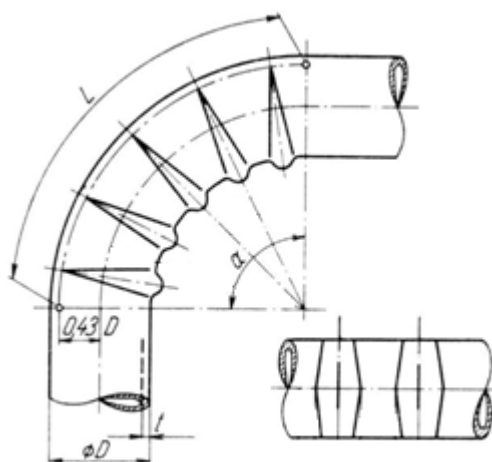
Jsou způsobeny prokluzováním trubky v čelistech, vlivem nedostatečného tlaku čelisti.



Obr. 29 – Zborcení profilu trubky se zvrásněním

2.7 Záhybové ohýbání

Ohyb probíhá za tepla, momentem způsobeným příčnými silami. Na ohřátý úsek vnitřní stěny (neohřívá se celý obvod, ale jen 5/6) vzniká tlak, který způsobí nejprve pětování materiálu a následně vybočení stěny a vytvoření záhybu [19]. Rozteč záhybů se stanovuje dle průměru trubky a dle úhlu ohybu pro jeden záhyb. Malý počet záhybů způsobuje větší odpor proti průtoku. Ohyb se provádí na pevných deskách pomocí lana a vrátku, přičemž v místě ohybu se trubky vyztužují objímkami proti zploštění průřezu.

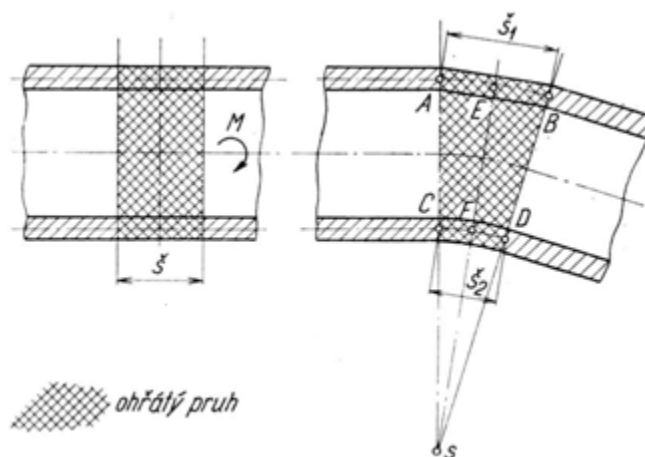


Obr. 30 – Záhybové ohýbání

2.8 Ohyb při středofrekvenčním indukčním ohřevu

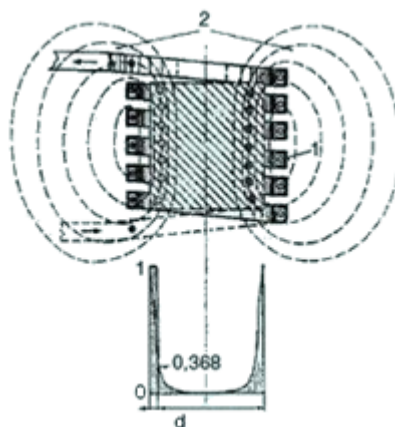
Výrobní technologie na bázi indukčního ohřevu trubek umožňuje výrobu náročných prvků ocelových konstrukcí včetně komplikovaných tvarových dílců, například oblouků střešních konstrukcí, nosných stavebních prvků eliptických i kruhových tvarů, mostních konstrukcí a dalších [8]. Zahřívá se jen velmi úzký pruh trubky v místě, kde má ohyb začínat, čímž se odstraní vybočení a vznik vln. Zbytek trubky je chladný a pevný. Velikost ohřívaného úseku je závislá na tvaru induktoru a na chlazení, ale by měla být co nejmenší, neboť má vliv na velikost odchylky kruhovitosti [19]. Po dosažení požadované tvářecí

teploty se pomocí přitlačné kladky začíná s ohybem. Odchylka kruhovitosti, která při tomto způsobu ohybu vzniká, se po dosažení určité konstantní hodnoty již dále nemění



Obr. 31 – Ohyb při indukčním ohřevu [18]

Ohřev probíhá pomocí vířivých proudů vznikajících v místě, kde na trubku působí střídavé elektromagnetické pole. V principu se jedná o transformátor, kde primární vinutí tvoří induktor, jímž protéká primární proud. Ohříváný materiál představuje sekundární vinutí s jedním závitem spojeným nakrátko. V ohřívané vsázce se hustota proudu nerozdělí rovnoměrně, ale při vyšších frekvencích klesá od povrchu ke středu, zhruba podle exponenciální křivky.



Obr. 32 – Indukční ohřev a rozložení hustoty proudu na povrchu válce:

1 – závit cívky, 2 – siločáry elmag. pole [5]

Hloubka, ve které hustota proudu klesne na hodnotu $1/e$ ($1/2,718 = 0,368$), se nazývá hloubka vniku [5]. Od povrchu vsázky do hloubky vniku se v materiálu vyvine přibližně 86 % celkového tepla. Ve zbývajících části vsázky se tedy absorbuje pouze zbývajících 14 % celkové energie. Volbou vysoké frekvence lze tedy např. dosáhnout toho, že se ohřeje pouze tenká povrchová vrstva. Při nízké frekvenci se naopak rovnoměrně prohřeje celá vsázka. Na účinnost ohřevu má vliv druh ohříváního materiálu, jeho elektrická vodivost, tvar a uspořádání induktoru vzhledem k trubce. Hloubka pronikání ohřevu závisí na frekvenci, měrném elektrickém odporu, a magnetické vodivosti ohříváního materiálu.

V praxi se pro indukční ohřev používají frekvence od 50 Hz do několika megahertzů. Zařízení pro indukční ohřev se napájejí z frekvenčních měničů. Pro ohřevy větších objemů je možné s výhodou využít síťovou frekvenci 50 Hz. Odpadne tak frekvenční měnič a jako zdroj je použita napájecí síť [15].

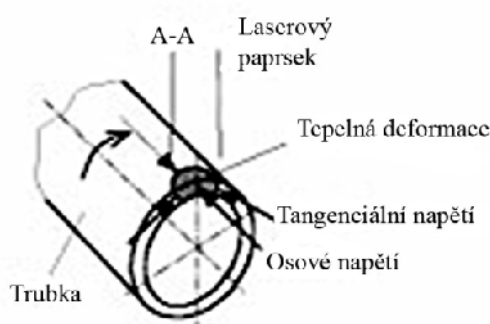
Důležitou součástí zařízení pro indukční ohřev je induktor. Obvykle je zhotoven z dutého měděného vodiče, protékaného chladicí vodou. Geometrické uspořádání induktoru musí zaručovat co nejtěsnější elektromagnetickou indukční vazbu s ohříváním předmětem. Na induktory jsou kladeny extrémní požadavky z hlediska elektrického a tepelného namáhání, protože jimi může v některých situacích téct proud v řádech desítek kA. Díky takto vysokým proudům také dochází i ke značnému mechanickému namáhání některých částí. Při takovém namáhání je nutné induktory vyrábět duté s vodním chlazením. Induktor může být válcový, plochý nebo lineární. Pro vhodné uspořádání elektromagnetického pole může být doplněn nástavci z transformátorových plechů nebo feritu.

Neméně důležitou součástí dodávky bývají i chladicí sprchy. Jejich použitím dochází ke zvýšení pevnosti, nebo i zakalení (v závislosti na materiálu trubky). Následně se proto často zařazuje žihání. Mohou být nedílnou součástí vlastního induktoru (tzv. dvoukomorové induktory) nebo zcela nezávislé, vyrobené buď z nemagnetických materiálů (mosaz, měď, hliník), nebo nekovové (teflon).

Hlavní přednosti indukčního ohřevu jsou možnost řízení intenzity ohřevu a rozložení teploty, povrchové vrstvy nejsou ohroženy chemickými změnami jako při ohřevu plamenem a nevznikají žádné produkty spalování, které mohou být i toxické.

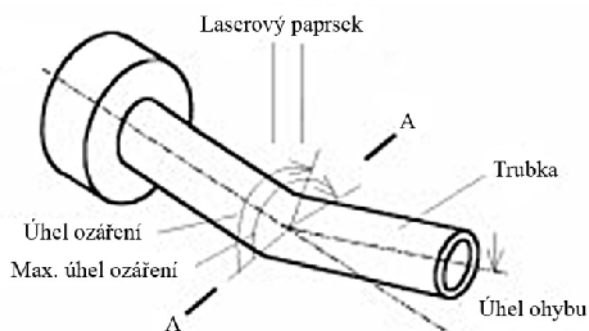
2.9 Ohyb pomocí ozáření laserem

Ohýbání trubek laserem je proces, při kterém se používá tepelné deformace indukované laserem k ohybu trubky bez potřeby pevného náradí nebo vnějších sil. Trubka se otáčí o 180° , popř. i více, a její vnější povrch je zahříván laserovým paprskem. Jeho velikost musí být větší, než tloušťka trubky, čímž je zajištěno, že ozařovaná oblast se ohřívá téměř současně a prochází plastickou deformací s rozšířením stěn, protože tepelná roztažnost do okolního materiálu je omezena [10]. Výsledná deformace je pak kombinací zkrácení v podélném směru trubky a roztažení materiálu ve směru radiálním, přičemž ohyb způsobený zesílením ozářené oblasti zároveň získává mírně vystouplý tvar.



Obr. 33 – Tepelně indukovaná napětí

Absence znatelného ztenčení neozařené strany trubky patří mezi hlavní výhody laserového ohybu. Při určování minimálního poloměru ohybu zde hrají hlavní roli zcela jiné parametry, nežli je tomu u ohybu mechanického. S rostoucím průměrem paprsku a poměrem vnějšího průměru trubky k tloušťce stěny se poloměr křivosti ohnuté trubky zvětšuje. Se zvětšujícím se úhlem ozařování rovněž roste účinnost ohybu.



Obr. 34 – Ohýbání laserem

Docílí se tak výrazného snížení nákladů především v prototypové a malosériové výrobě. Dochází nejen k menšímu ztenčení stěny trubky, ale výrazně menší je i výsledná odchylka kruhovitosti. Použití laserového paprsku (a tím i vneseného tepla) je velmi flexibilní a při použití CNC systémů lze celý proces snadno automatizovat. Jeho použití je výhodné především tam, kde by při užití konvenčních metod ohybu bylo potřeba používat opakovaného žíhání ohýbaného materiálu.

3 Analýza tepelně mechanických parametrů ohybových procesů

Plastické vlastnosti a průběh deformace jsou ovlivněny vlastnostmi materiálové matrice a inkluzí. Obecně platí, že všechny vlivy zvyšující pevnost matrice snižují její plasticitu. Čím je struktura jemnozrnější, tím více roste přetvárný odpor a mění se plastičnost materiálu. Rovněž různá velikost zrn je příčinou horších plastických vlastností z důvodu nerovnoměrného postupu deformace. Vliv mezikrystalické hmoty spočívá v přítomnosti příměsí - inkluzí (vměstky, karbidy, intermetalické fáze, sekundární fáze) a v oslabení vazeb mezi zrny vlivem jejího nerovnoměrného rozdělení [12]. Běžné materiály mají šest různých druhů krystalické mřížky. Tyto pak mohou být ještě dále plošně či prostorově centrovány. Nejjednodušší je plošně centrovaná kubická mřížka, kterou lze také nejsnadněji tvářet pro její příznivě orientovaných krystalických rovin, kladoucí jen malý odpor kluzovým deformacím. Kromě strukturních parametrů jsou mechanické vlastnosti materiálu ovlivněny i chemickým složením, což se projevuje především u vícefázových struktur. Neželezné kovy mají zpravidla odpor proti deformaci malý, u oceli závisí na obsahu uhlíku. S jeho nárůstem stoupají i deformační odpory a roste pevnost. Některé materiály tak lze tvářet již za normální teploty, většinu však až za vyšších teplot. Tváření tedy můžeme podle závislosti na teplotě rozdělit na:

- **Tváření za studena:** Jedná se o tváření při teplotách do $0,25 T_{\text{tav}}$. Dochází ke zpevňování materiálu (zvyšuje se mez kluzu a pevnosti, snižuje tažnost a kontrakce) a deformační textuře (zdeformovaná struktura orientovaná ve směru hlavní deformace), uzdravovací procesy jsou neúčinné. Obnovit vyčerpanou deformační schopnost materiálu je možno jeho opětovným zahříváním, kdy zpevnění vzniklé při tváření díky rekrystalizaci mizí.
- **Tváření za zvýšených teplot:** Jedná se o tváření v rozmezí teplot $0,25 - 0,5 T_{\text{tav}}$. Pro praktické použití se však používá spíše hodnot $0,4 - 0,6 T_{\text{tav}}$. Struktura je zdeformovaná, dochází k mírnému poklesu pevnosti, zlepšení plasticity. Při teplotě $0,35 T_{\text{tav}}$ dochází k tzv. zotavení – uvolnění části dislokací a změně jejich uspořádání.

- **Tváření za tepla:** Jedná se o tváření v rozmezí teplot $0,5 - 0,8 T_{\text{tav}}$. Je zpravidla označováno jako tváření nad rekrytalizační teplotou, tj. za takové teploty T a rychlosti deformace ε , aby v materiálu vznikla nová struktura, při které zůstává nízká hodnota přetvárných odporů. Děje se tak prostřednictvím uzdravovacích mechanismů dynamického zotavení a dynamické rekrytalizace, které probíhají s deformací téměř současně. Mezi výhody tváření za tepla patří především nízké přetvárné odpory materiálu a tedy i potřeba menších tvářecích sil, což zase znamená i menší a lehčí zařízení. Nevýhodou je naopak vyšší energetická náročnost procesu, oxidace materiálu, nižší životnost nástrojů.

Z hlediska tepelně mechanických parametrů jde především o:

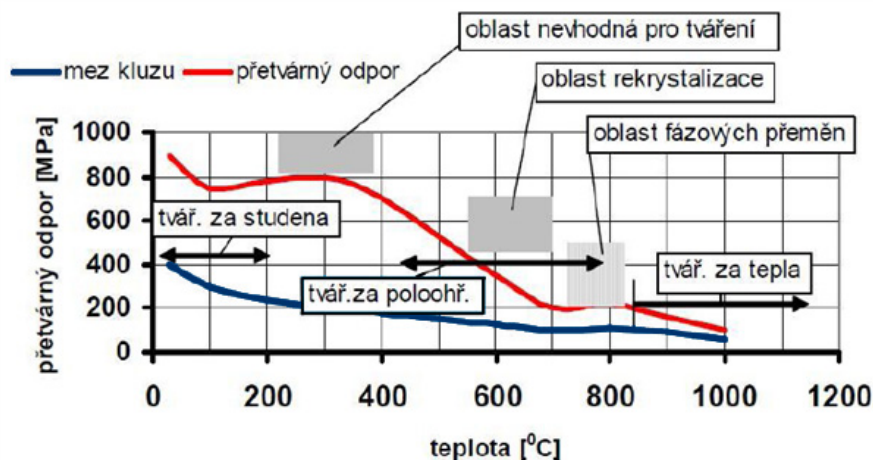
- **Přetvárný odpor σ_p :** Jde o vlastnost materiálu vzdorovat plastické deformaci. Jeho mírou je napětí a jednotkou 1 MPa [12]. Kromě teploty je dále funkcí materiálu (chemické složení a struktura), stupně a rychlosti deformace, stavu napjatosti a tření. Při tváření za studena závisí především na stupni deformace, za tepla pak na rychlosti deformace a teplotě. Určuje se z křivek zpevnění (závislost mezi napětím a deformací), vzešlých ze zkoušek tvařitelnosti a lze je aproximovat celou řadou funkcí. Pokud se je zjišťován za definovaného stavu napjatosti, konstantní teploty i deformační rychlosti a s vyloučením tření, nazývá se pak přetvárný odpor přirozený. Celkový přetvárný odpor je vždy vztažen k technologickému procesu, zahrnuje i tření a je proto o trochu větší. Pro většinu tvárných kovů lze přetvárný odpor popsat rovnicí:

$$\sigma = C \cdot \varepsilon^n \quad (3)$$

Kde:

$$C = R_m \cdot \frac{\varepsilon^n}{n^n} \quad (4)$$

$$n = \ln \left(1 + \frac{A}{100} \right) \quad (5)$$



Obr. 35 – Závislost přetvárného odporu na teplotě [2]

- **Rychlost deformace $\dot{\epsilon}$:** Je definována jako rychlost, kterou se při tváření blíží průřezy tvářeného materiálu [13]. S jejím růstem roste také teplota tvářeného materiálu, napětí a tvářecí síly, plastický lom přechází v křehký (zvyšuje se kritická teplota). I závislost přetvárného odporu na teplotě úzce souvisí se závislostí na deformační rychlosti. Snížení deformační rychlosti má podobný vliv, jako zvýšení teploty.

$$d\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (6)$$

Vliv rychlosti deformace na přetvárný odpor bývá obvykle aproximován [12] výrazem:

$$\sigma = C \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (7)$$

Kde:

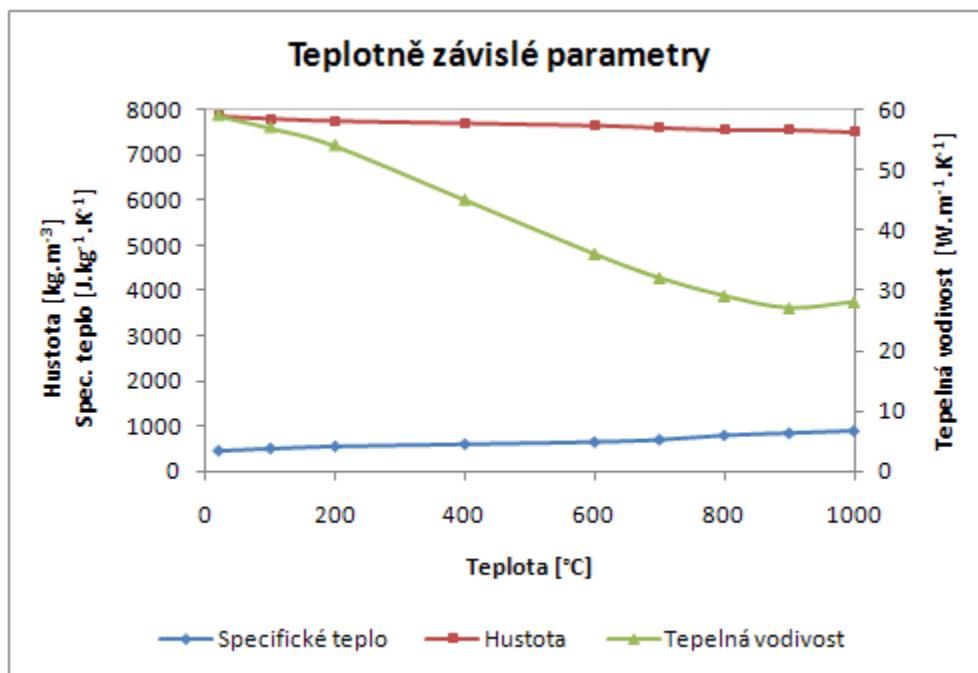
$$C = f(\epsilon, M, T)$$

$m = 0 - 0,03$ pro většinu materiálů při pokojové teplotě

- **Hustota materiálu ρ :** je vlastností látky, která určuje hmotnost látky v jednotce objemu.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (8)$$

- **Měrná tepelná kapacita c :** je závislá na teplotě látky. Protože se však s teplotou mění zpravidla velmi málo, rovná se číselně množství tepla, kterým se jednotka hmoty dané látky ohřeje o jeden stupeň [20]. Jednotkou je $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$.
- **Tepelná vodivost λ :** je mírně závislá na teplotě. U kovů s rostoucí teplotou klesá (např. u polovodičů s teplotou naopak roste) [20]. Jednotkou je $[W.m^{-1}.K^{-1}]$.
- **Teplotní součinitel délkové roztažnosti α :** je to konstanta látky obecně závislá na teplotě. Ve velkém teplotním intervalu nemá teplotní délková roztažnost lineární charakter. Při teplotách blízkých absolutní nule se délka nijak výrazně nemění. Naopak při teplotách několika set $^{\circ}C$ se mění rychleji. Největší difference od lineárního charakteru průběhu se objevují u teplot, při nichž dochází ke změnám ve vnitřních strukturách látek [20]. Jednotkou je $[K^{-1}]$.

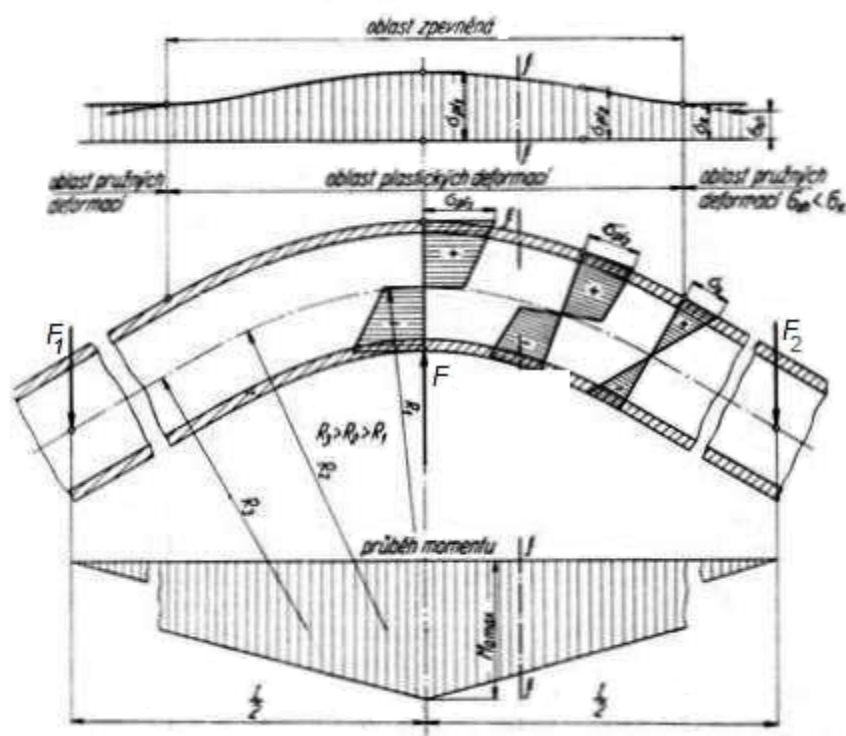


Obr. 36 – Teplotně závislé veličiny pro ocel ČSN 11 523 [1]

Trubky mohou být mechanicky ohýbány za tepla či za studena. Předpisy pro tváření a tepelné zpracování trubek přesněji to stanovuje norma ČSN 42 0284 - Předpisy pro zpracování uhlíkových ocelí třídy 11, 12 a ocelí na odlitky třídy 26, užívaných pro stavbu parních kotlů, parovodů a tlakových nádob, pracujících za normálních nebo zvýšených teplot, článek 33 - 46 [3].

▪ Ohýbání za studena

Ohýbání trubek za studena je preferováno především z ekonomických důvodů, neboť odpadají náklady na přípravu polotovaru, tedy především na ohřev materiálu.



Obr. 37 – Průběh momentu a meze kluzu v jednotlivých místech ohýbané trubky

Během tváření za studena dochází nejprve k pružnému ohybu, kdy jsou krajní vlákna na vnější straně ohybu namáhána tahovým napětím a krajní vlákna na vnitřní straně napětím tlakovým. Rozložení napětí je v příčném řezu lineární, směrem k neutrální ose

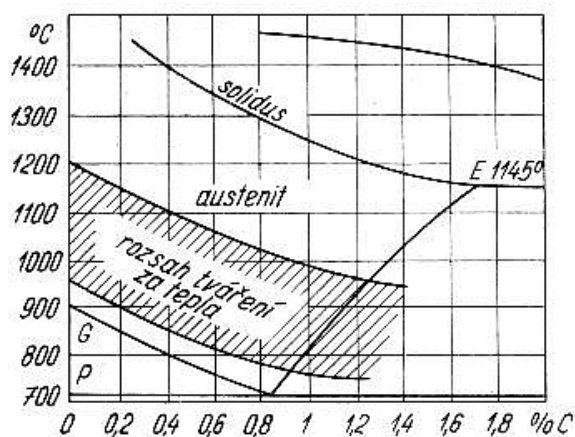
klesá a na ní je pak rovno nule [19]. Po překročení meze kluzu dochází k plastické deformaci, průběh napětí přestává být lineární a ohýbaná trubka se deformuje. Na vnějším okraji ohýbaného oblouku dochází ke ztenčení stěny, na vnitřním k jejímu rozšíření. V neutrální ose roste tahové napětí a její poloha se postupně přesouvá směrem ke středu ohybu.

Výhodou je rozměrová přesnost, neokoujený povrch a zlepšování vlastností zpevněním. Nevýhodou pak potřeba užívat velké tvářecí síly, nerovnoměrné zpevňování a rovněž omezená tvárnost materiálu.

Mezi nejběžnější způsoby ohýbání trubek za studena patří navíjení na ohýbací segmenty s podpěrným trnem i bez, zakružování a ohýbání na lisech.

▪ Ohýbání za tepla

Jde o tváření za teplot přesahující teplotu rekrystalizace. Pevnost materiálů klesá a uzdravovací procesy zotavení a rekrystalizace probíhají zároveň s deformací. Používá se pro trubky, které jsou méně houževnaté a po vyčerpání vnitřní přetvárné práce by praskaly, nebo pro menší poloměry ohybu, kde zase hrozí překročení tažnosti materiálu. Jde zpravidla o trubky větších rozměrů. Teplota tváření závisí zpravidla na složení oceli a obsahu uhlíku. Tváření probíhá v oblasti austenitu, nejvyšší teplota má být cca 100 - 200 °C pod teplotou solidu v diagramu Fe-C. Při ohřevu je nutno dbát na to, aby nebyla překračována hranice 750 – 950 °C (dle chem. složení), jinak hrozí zvýšené okujení, zhrubnutí zrna a může dojít až ke ztrátě stability tvaru průřezu.

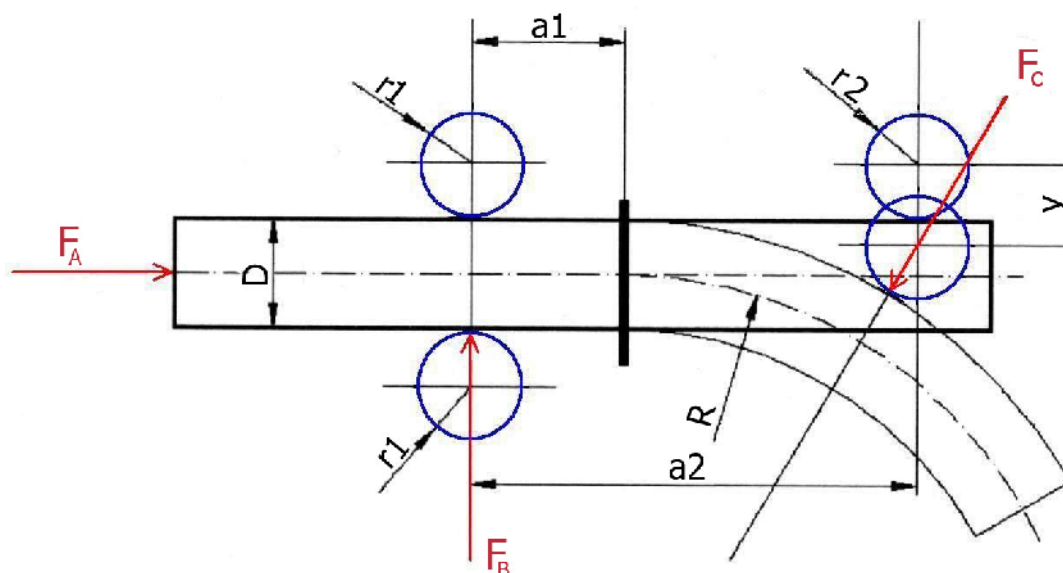


Obr. 38 – Rozsah tvářecích teplot pro uhlíkové oceli [19]

Důležité také je, aby teplota při ohýbání neklesla pod spodní mez, což je u trubek se zřetelem na jejich tenkostěnnost poměrně snadné. Volba způsobu ohýbání za tepla závisí na objemu výroby, na rozměrech ohýbané trubky a na požadovaných vlastnostech trubek v provozu. Mezi nejčastější ohýbání trubek za tepla patří ohyb trubek plněných pískem, ohýbání na tvarovém trnu a ohyby s indukčním ohřevem.

4 Stanovení základních vektorů sil působících v ohybovém zařízení

Ohýbací zařízení použité na ohýbání ocelových trubek je koncipováno jako tlačné s ohýbací kladkou, kde trubka je uchycena a tlačena mezi kladky. Z hlediska sil a momentů je tento způsob založen na ohýbání momentem způsobeným přitlačnou silou, za současného působení tlaku. Síla vzhledem k trubce mění své působišť [4].



Obr. 39 – Schéma kladkové ohýbačky

- Silové reakce: F_A – tlačné zařízení [N]
 F_B – vodící kladky [N]
 F_C – ohýbací kladka [N]

$$F_A = \frac{M_o}{L \cdot \tan \left[\sin^{-1} \left(\frac{L}{R + \frac{D}{2}} \right) \right]} \quad (9)$$

$$F_B = \frac{M_o}{L} \quad (10)$$

$$F_c = \frac{M_o}{L \cdot \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{L}{R + \frac{D}{2}} \right) \right]} \quad (11)$$

Kde:

- Ohybový moment M_o [Nm] (vychází ze vztahu pro plastický ohyb):

$$M_o = \frac{3 \cdot \sigma_p \cdot W_o}{(2 + n)} \quad (12)$$

- Průřezový modul trubky v ohybu W_o [mm³]:

$$W_o = \frac{\pi \cdot D^3 \left[1 - \left(\frac{D - 2 \cdot s}{D} \right)^4 \right]}{32} \quad (13)$$

- Přetvárný odpor σ_p [MPa]:

$$\sigma_p = C \cdot \varepsilon^n \quad (14)$$

- ε – deformace [-]:

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{R + \frac{D}{2}}{R} \right) \quad (15)$$

- n – exponent zpevnění (pro tváření za tepla 0 – 0,03)
- Materiálová konstanta C (aproximací pomocí funkce):

$$C = S_o \cdot A_1 \cdot \exp(-m_1 \cdot T) \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \dot{\varepsilon}^{m_s} \quad (16)$$

veličiny S_o , A_1 , A_2 , A_3 , m_1 , m_3 jsou materiálové konstanty odvozované na základě plastometrických měření [6].

Tab. 1

materiál	So	A ₁	A ₂	A ₃	m ₁	m ₂	m ₃
11 523	100,4	18,17	1,516	0,75	0,0028	0,181	0,124

- T – teplota ohřevu v místě ohybu [°C]
- $\dot{\varepsilon}$ – rychlost deformace [s⁻¹]:

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon \cdot \frac{v}{R} \quad (17)$$

- v – rychlost posuvu tlačného zařízení [mm.s⁻¹]
- Minimální poloměr nastavení trubky R_{min} [mm]:

$$R \geq R_{\min} = 4k(D - t) \quad (18)$$

- materiálový koeficient k [-]:

Tab. 2

k	T [°C]			
materiál	730	850	960	1050
11 523	1,8	2,1	2,37	2,59

- Délka ramena kladky L [mm]:

$$L = a_2 - a_1 \quad (19)$$

příčměž L_{min} [mm]:

$$L_{\min} = \frac{\sigma_p \cdot \pi \cdot D^3 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]}{32 \cdot F_C} \quad (20)$$

- Vnitřní průměr trubky d [mm]:

$$d = D - 2t \quad (21)$$

- Nastavení ohýbací kladky v podélném a příčném směru [mm]:

$$y = R_n + \frac{D}{2} + \frac{D_k}{2} - \sqrt{\left(R_n + \frac{D}{2} + \frac{D_k}{2}\right)^2 - \left(a_2 - \frac{a_1}{2}\right)^2} \quad (22)$$

- Poloměr nastavení R_n [mm] (pro dosažení požadovaného poloměru po odpružení):

$$R_n = \frac{R \cdot E \cdot I}{M_o \cdot R + E \cdot I} \quad (23)$$

- Moment setrvačnosti I [mm⁴]:

$$I = \frac{\pi [D^4 - (D - 2t)^4]}{64} \quad (24)$$

- Výsledná odchylka kruhovitosti o [%]:

$$o = \frac{7,45 \cdot r^2 \cdot F_C}{E \cdot J} \cdot 100 \quad (25)$$

- modul pružnosti E je funkcí teploty a v austenitizační oblasti má cca 164 000 MPa.

- Střední poloměr ohýbané trubky r [mm]:

$$r = \frac{D - t}{2} \quad (26)$$

- Moment setrvačnosti prstence J [mm⁴]:

$$J = \frac{b \cdot s^3}{12} \quad (27)$$

- relativní šířka průhybu b [mm]:

Tab.3

D/s	D/s<30	30<D/s<50	D/s>50
b	D	2/3D	1/2D

Na výslednou odchylku kruhovitosti mají, krom tvaru a nastavení nástrojů, vliv i odchylky v jakosti a rozměrech trubek.

5 Provedení analýzy pro materiálové reprezentanty různých legovacích konceptů

Jako materiálový reprezentant byla pro analýzu trubky TR KR 377x16 zvolena nelegovaná konstrukční ocel 11 523.

- Použití: Vhodná pro svařované konstrukce a strojní součásti s vyšší mezí kluzu, staticky i dynamicky namáhané – součásti strojů, automobilů, motocyklů, jízdních kol, tepelných energetických zařízení, tlakové nádoby, mostní konstrukce atp. [9].
- Označení:

Tab. 4

ČSN 42 0002	EN 10027-1	EN 10027-2	UNI	DIN	ANFOR
11 523	S355J0	1.0053	Fe 510C	St 52-3 U	E 36-3

- Vlastnosti oceli ČSN 11 523:

Tab. 5

Chemické složení [%]					
C	Mn	Si	P	S	N
0,2	1,6	0,55	0,04	0,04	0,009

Tab. 6

Mechanické vlastnosti							
Re _{min}	Rm _{min}	A _{5min}	HV _{max}	τ _{ck}	σ _c	σ _{co}	KV
355 Mpa	490 Mpa	22%	222	170 Mpa	185 Mpa	240 Mpa	27 J

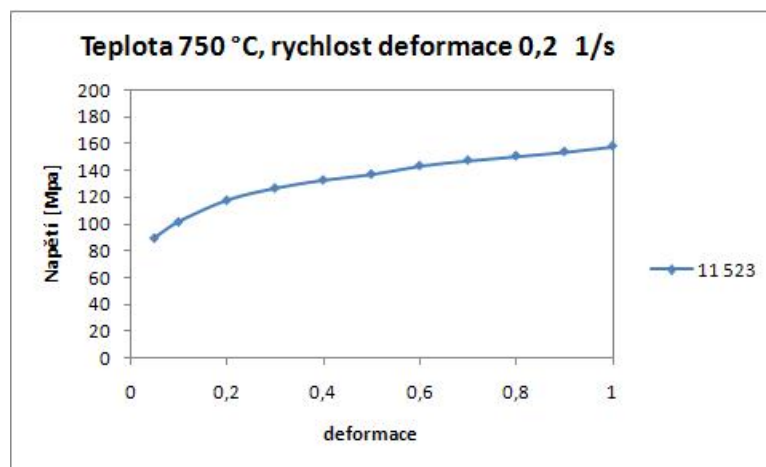
Tab. 7

Tepelné zpracování		
normalizační žihání	870 - 900°C	ochlazovat na vzduchu
žihání na měkko	680 - 710°C	ochlazovat zvolna
žihání ke snížení pnutí	600 - 650°C	ochlazovat zvolna
popouštění	670 - 700°C	ochlazovat na vzduchu
tvářitelnost	1 150 - 800°C	třída tvářitelnosti za tepla 1

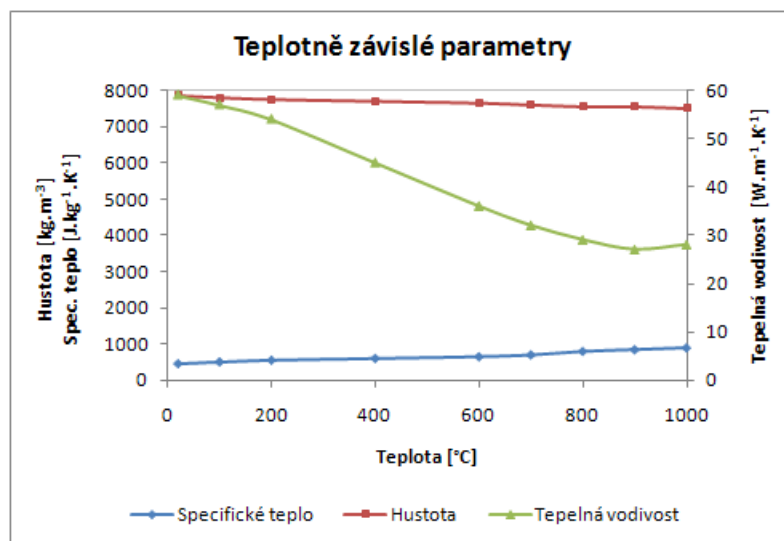
[3]

5.1 Konstitutivní matice

Proces tváření lze obecně považovat za tepelně aktivovaný jev, při kterém je deformační odpor podmíněn interakcemi mezi pohyblivými dislokacemi a překážkami. Zvýšení odporu technických materiálů proti vzniku a při rozvoji plastické deformace je vázáno na mez kluzu jako počátek oblasti zpevňování při přetváření. Při matematickém popisu tvářecí technologie je zvláště důležitá kvantifikace těchto jevů. Jedná se o vlastnosti materiálů vyjadřující jejich chování v procesu zatěžování v závislosti na přetvoření materiálu. Tato chování jsou popisována příslušnými matematickými závislostmi – konstitutivními rovnicemi. Jde o závislost mezi prvky tenzoru napětí a tenzoru přetvoření (závislost deformačního odporu na přetvoření, rychlosti přetvoření a na teplotě), v nichž se vyskytují i příslušné materiálové charakteristiky [6].



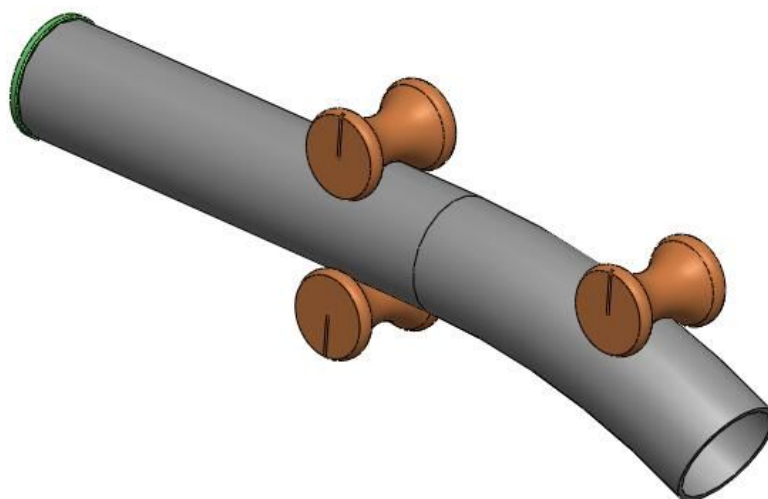
Obr. 40 – Graf přetvárného odporu oceli 11 523 [1]



Obr. 41 – Graf Teplotně závislých parametrů oceli 11 523 [1]

5.2 *Prostorový model*

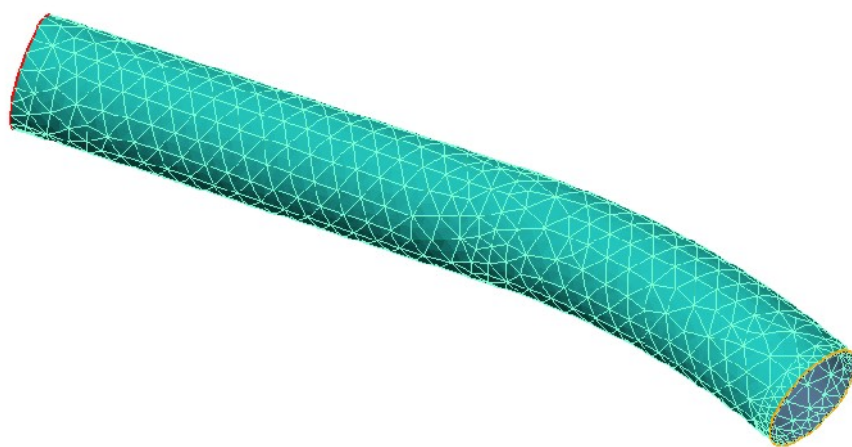
Ohýbací zařízení je navrženo jako tlačné s ohýbací kladkou, kdy trubka je soustavou vodících kladek tlačena přes indukční ohřívací zařízení (s vodním ochlazením) proti kladce ohýbací. Prostorový model technologického procesu byl vytvořen v 3D CAD programu SolidWorks firmy Dassault Systemes a následně exportován přes souborový formát STEP (STandard for Exchange of Product model data - standard pro výměnu CAD dat) do programu QForm 2D/3D firmy QuantorForm Limited [14].



Obr. 42 – Geometrický model ohybového procesu

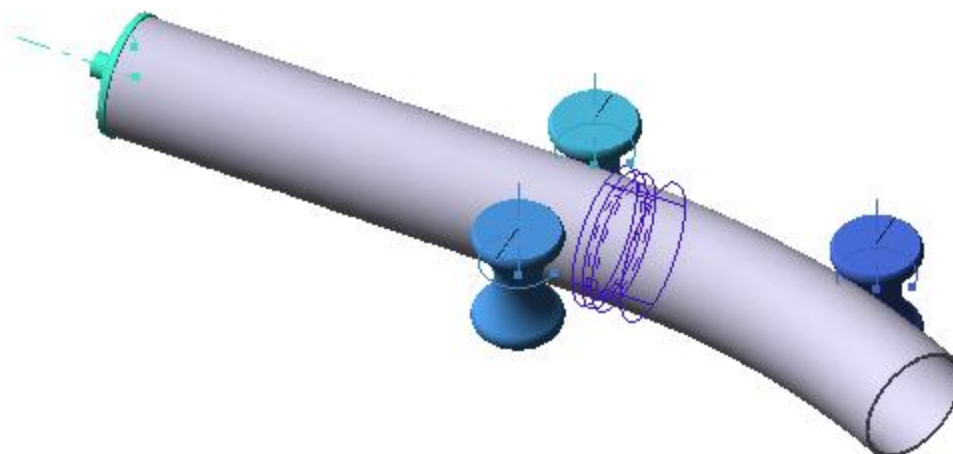
5.3 Analýza pro vybraný materiálový reprezentant

Analýza ohybu trubek byla provedena v softwaru QForm2D/3D metodu konečných prvků MKP / FEM - numerickou metodou pro analýzu struktur a těles (FEM - Finite Element Metod). Jejím základem je rozklad tělesa na jednotlivé prvky, zpravidla troj a čtyřúhelníky, které jsou snadno popsitelné matematicky [7].



Obr. 43 – Zasít'ovaná trubka $\varnothing 377 \times 16$ pro MKP

Simulaci vlivu ohřevu s následným ochlazením na ohýbaný vzorek materiálu umožňuje software QForm 2D/3D řešit pomocí tzv. boxingu, kdy je možno ve vybrané oblasti zkonstruovat prostor – box, ve kterém lze nadefinovat požadované podmínky.

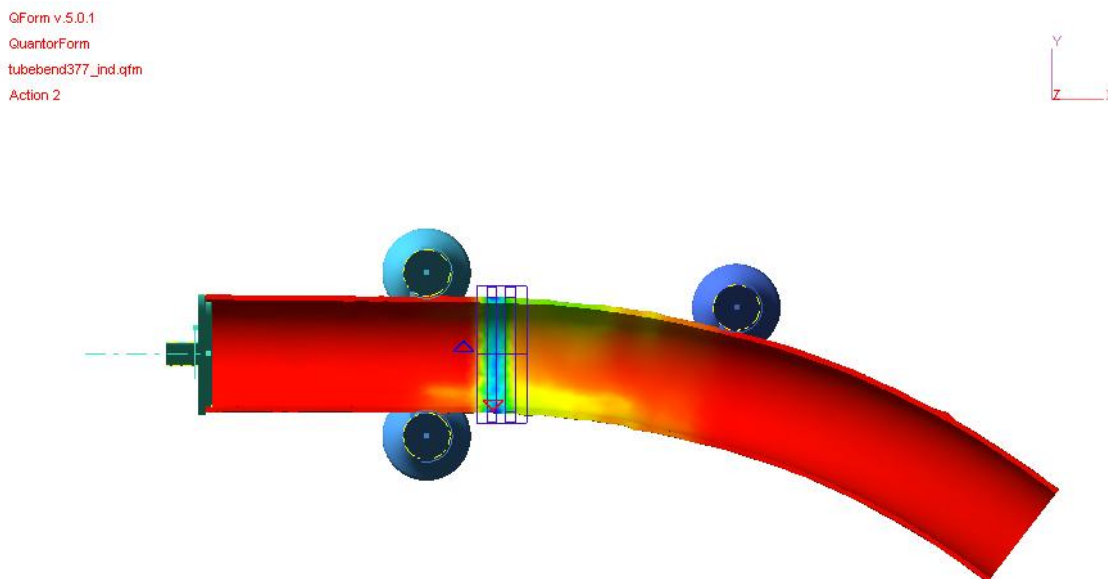


Obr. 44 – Simulace ohřevu + ochlazení pomocí boxu

V průběhu analýzy zvoleného materiálového reprezentanta byly pořízeny výstupy rozložení těchto veličin:

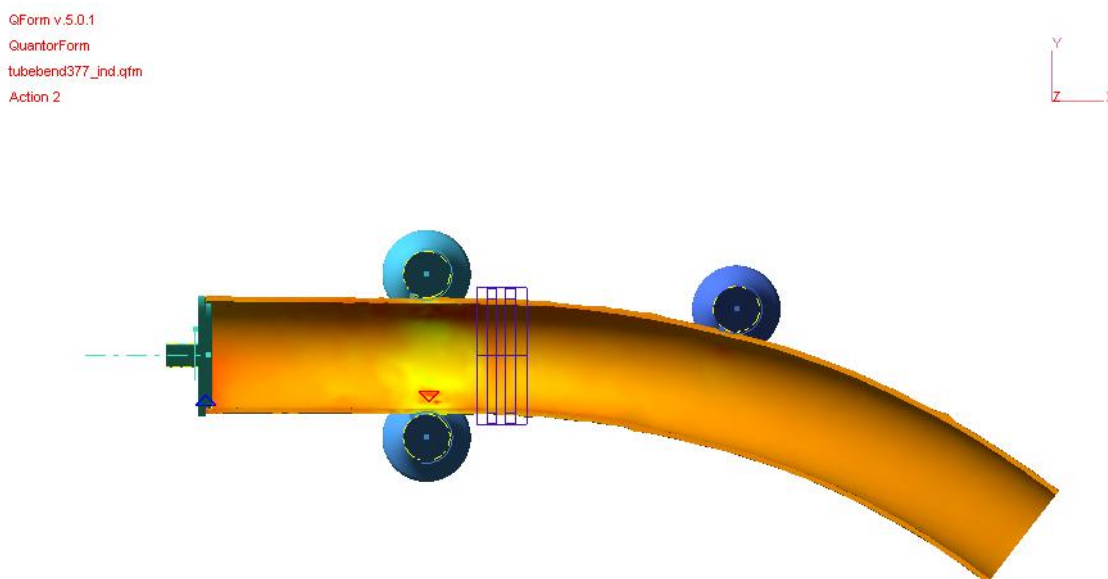
- přetvárný odpor
- střední (tzv. hydrostatické) napětí
- efektivní deformace

Místa s maximální hodnotou sledované veličiny jsou v obrázcích vyznačena modrým trojúhelníkem, místa s minimální pak trojúhelníkem červeným.



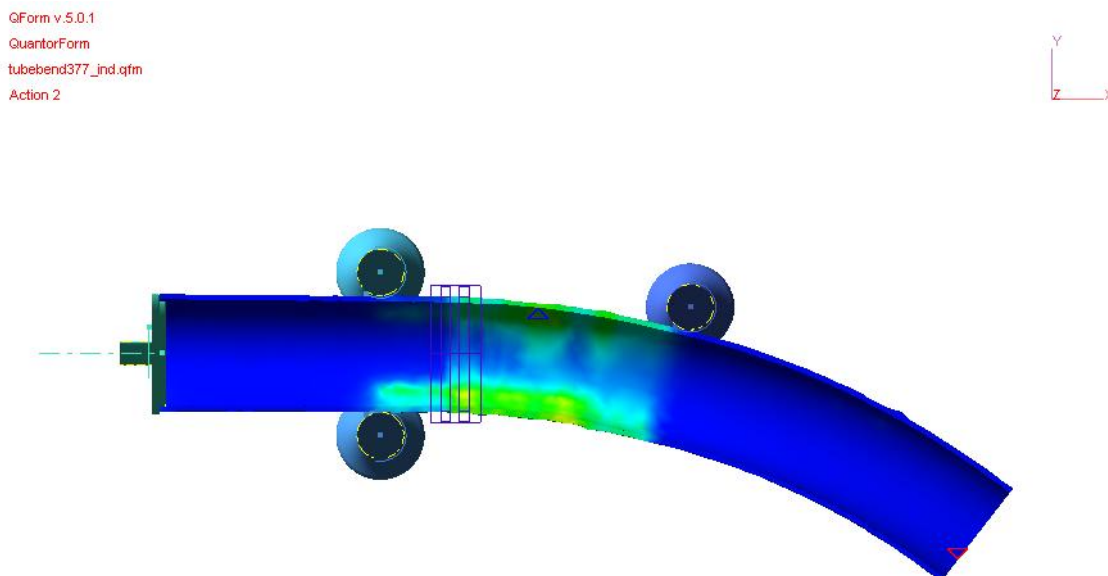
Obr. 45 – Přetvárný odpor

Přetvárný odpor σ_p , závislý na stupni logaritmické deformace ϕ a teplotě. Představuje materiálovou vlastnost vzdorovat plastické deformaci. Maximální dosažená hodnota je 599,3 MPa.



Obr. 46 – Střední (hydrostatické) napětí

Hydrostatické napětí má charakter všestranného, prostorového napětí. Ukazuje na rozložení napětí, vyvolaného ohybovým momentem. Maxima 821,5 MPa bylo dosaženo v působišti silové reakce na vnitřní vodící kladce.



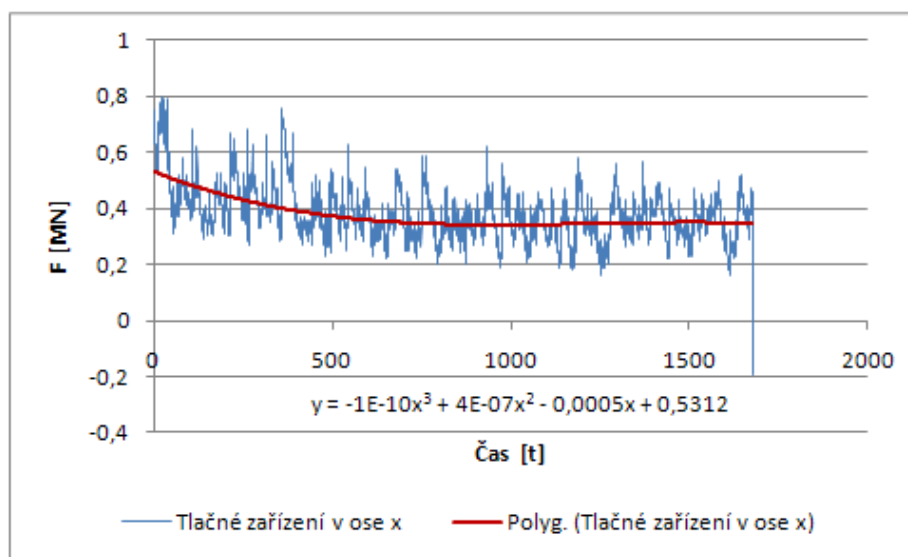
Obr. 47 – Efektivní deformace

Efektivní deformace je bezrozměrný faktor koncentrace napětí. Nejvyšší dosažená hodnota je 0,191.

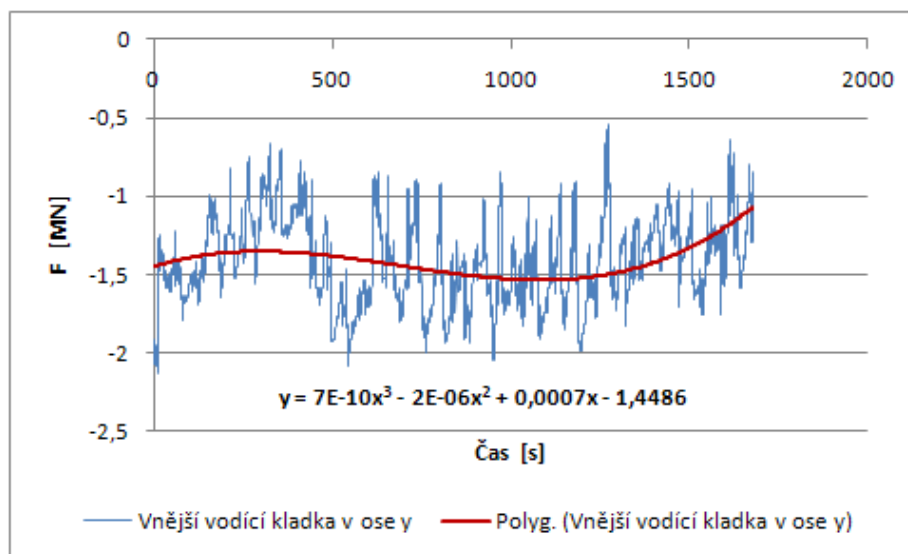
Kromě analýzy materiálových vlastností zvoleného reprezentanta při ohybu za tepla je rovněž důležité zjistit reakce, působící do hlavních částí ohýbacího zařízení.

5.4 Silové parametry při ohybu

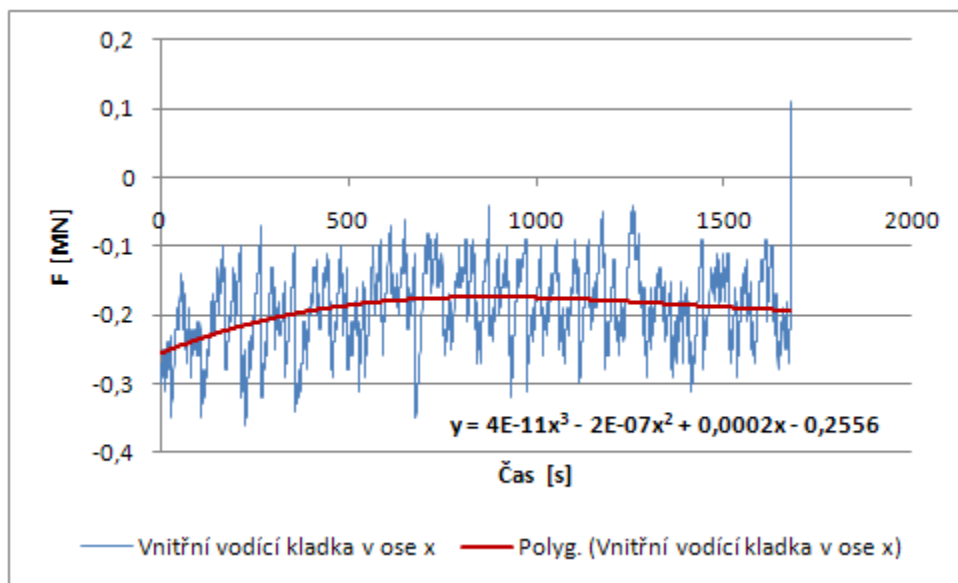
Důležitým výstupním parametrem provedené analýzy jsou i reakce, působící v hlavních částech ohýbacího zařízení (tj. tlačném zařízení, vodící a ohýbací kladce). Výpočtem pomocí MKP v programu QForm 2D/3D bylo zjištěno, že největšímu zatížení je vystavena vodící kladka na vnitřní straně ohybu trubky. Toto bylo v rozporu s předpokladem, neboť maximální namáhání bylo očekáváno na kladce ohýbací. Průběhy sil jsou zachyceny v grafech a maxima zjištěných hodnot seřazeny v tabulce. Pro porovnání jsou připojeny i hodnoty získané analytickým výpočtem.



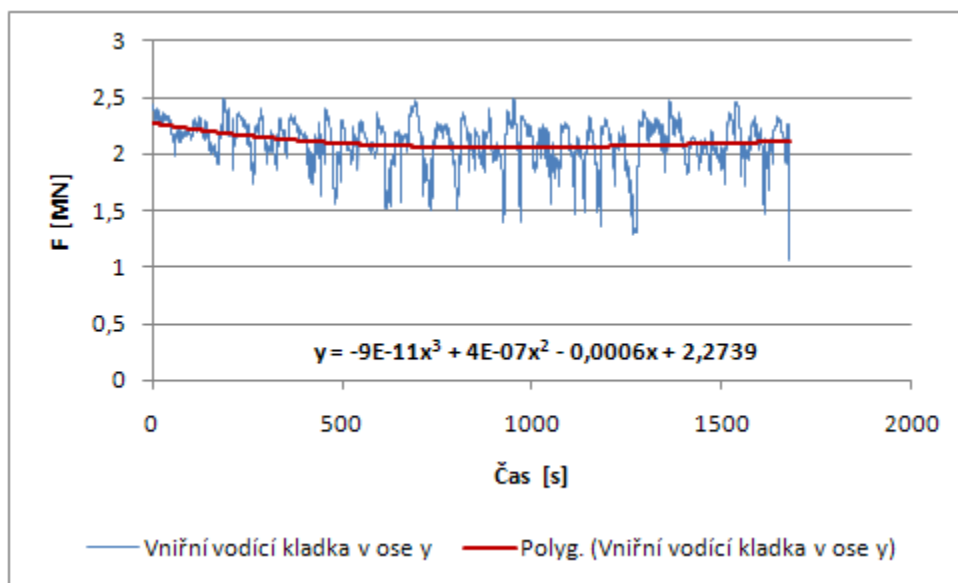
Obr. 48 – Graf silových reakcí na tlačném zařízení v ose x



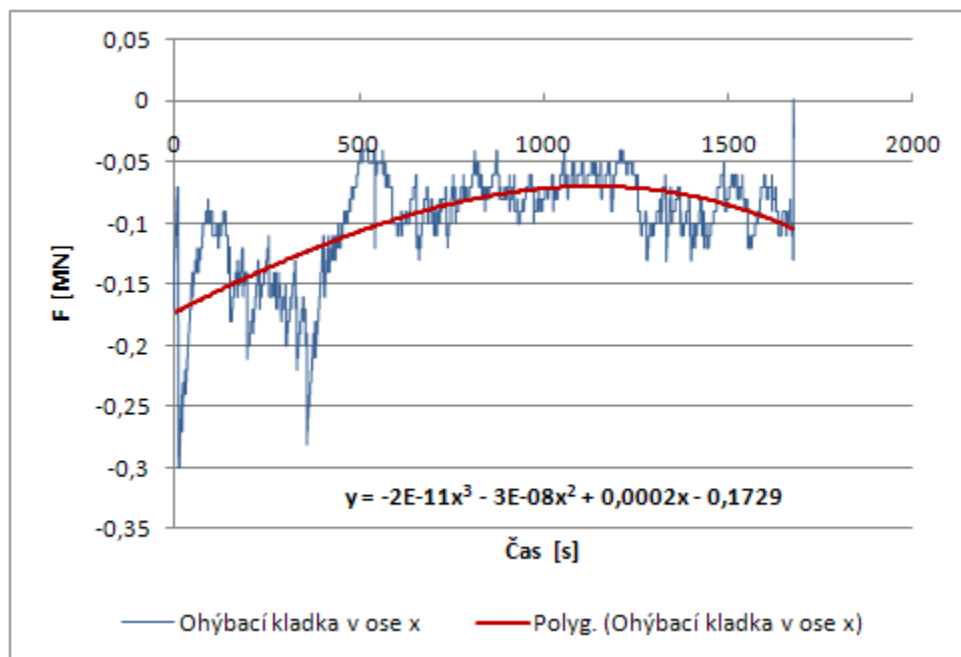
Obr. 49 – Graf silových reakcí v ose y na vodící kladce vnější



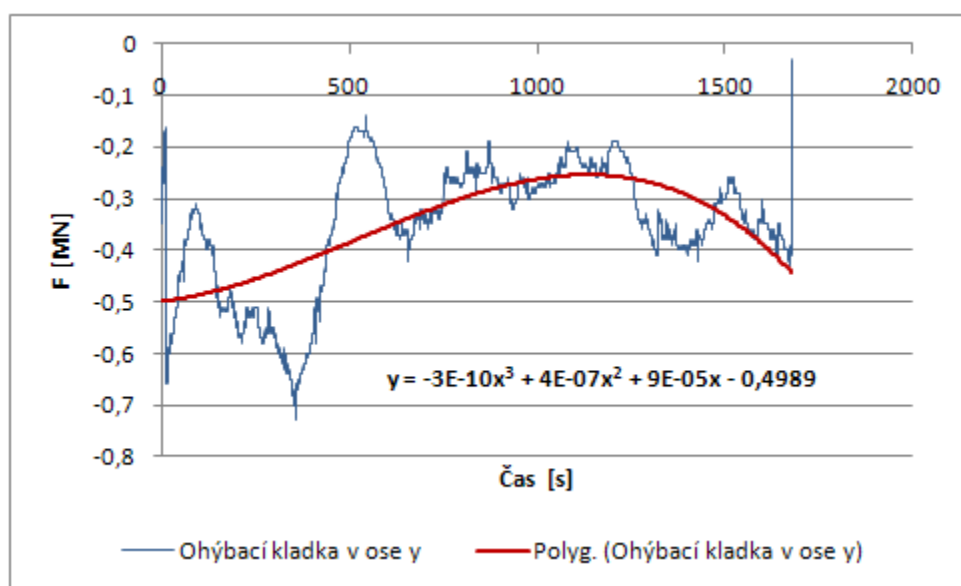
Obr. 50 – Graf silových reakcí v ose x na vodící kladce vnitřní



Obr. 51 – Graf silových reakcí v ose y na vodící kladce vnitřní



Obr. 52 – Graf silových reakcí na ohýbací kladce v ose x



Obr. 53 – Graf silových reakcí na ohýbací kladce v ose y

Tab. 8 Porovnání hodnot zátěžných sil dle jednotlivých metod

Materiál ČSN 11 523	Tlačné zařízení F [MN]		Vodící kladka vnější F [MN]		Vodící kladka vnitřní F [MN]		Ohýbací kladka F [MN]	
	Analyt.	FEM	Analyt.	FEM	Analyt.	FEM	Analyt.	FEM
377 x 16	0,032	0,8	×	2,13	0,108	2,5	0,113	0,73

Tab. 9 Rozložení zatěžujících sil v jednotlivých osách

Materiál ČSN 11 523	Tlačné zařízení F [MN]	Vodící kladka vnější F [MN]	Vodící kladka vnitřní F [MN]		Ohýbací kladka F [MN]	
	Zatížení v ose x	Zatížení v ose y	Zatížení v ose x	Zatížení v ose y	Zatížení v ose x	Zatížení v ose y
FEM	0,8	2,13	0,36	2,5	0,3	0,73

6 Diskuze dosažených výsledků

Cílem diplomové práce je provést rozbor současného stavu při ohybu trub velkých průměrů, definovat problémy vznikající při ohybu a na zvoleném materiálovém reprezentantu provést analýzu průběhu s návrhem řešení.

V první souhrnné části je uveden přehled používaných technologií pro ohýbání trubek velkých průměrů s jejich klady i zápory. Dále práce obsahuje část analytickou, kde jsou popsány metody výpočtu jednotlivých rozměrových a materiálových parametrů. Poslední část diplomové práce se pak zabývá analýzou technologie zkružování trubek pro vybraný materiálový reprezentant. Pro tuto analýzu byl vytvořen prostorový model technologického procesu ohybu trubky za tepla, kdy je trubka tlačena soustavou vodících kladek přes indukční ohřívací zařízení s následným ochlazením proti kladce ohýbací. Pomocí MKP bylo zjištěno, že největší síly působí na vnitřní vodící kladku ohýbacího stroje, což bylo v rozporu s očekáváním po předchozím provedení klasických výpočtů. Tyto předpokládaly maximální silové zatížení na kladce ohýbací. Diference mezi klasickým výpočtem technologických parametrů za použití rovnic a FEM je způsobena zjednodušeními v rovnicích, kdy jsou např. materiálové koeficienty považovány za neměnné hodnoty. FEM analýza umožnila stanovit síly působící na jednotlivé části soustavy ohýbacího stroje mnohem přesněji. Hodnoty sil pro zvolený rozměrový reprezentant 377x16 jsou uvedeny v tabulce, kde jsou pro srovnání uvedeny jak hodnoty FEM analýzy, tak i klasického výpočtu. Kromě celkových maxim je v další tabulce uveden i rozklad sil působící na jednotlivé nástroje do složek. Uvedené hodnoty se i tak mohou ve skutečnosti lišit, neboť i FEM je pouze simulační metoda a používá rovněž určitá zjednodušení. Přesto se pomocí ní podařilo mnohem přesněji určit jak silová namáhání na jednotlivých nástrojích, tak i další nastavení ohýbacího stroje, jako např. optimálnější vzdálenost vodících a ohýbací kladky či vzdálenost ohýbací kladky od induktoru. Toto by si dále zasloužilo přesnější kinematické vyhodnocení celého systému a novou analýzu k dalšímu upřesnění nastavení stroje. Umožnilo by to mít v ještě větší míře pod kontrolou průvodní jevy ohybu, zpřesnit celý proces a tím opět snížit množství vad a poruch během ohybu.

7 Použité zdroje

- [1] BÁLEK, S.: *Tepelně technické tabulky a diagramy*. Ostrava: VŠB, 1979. 129 s. ISBN 80-7078-974-3.
- [2] BEROUN, S.: *Úvod do strojírenství*. [online]. c2008-2009, [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <http://www.ksd.tul.cz/studenti/texty/uvod_do_strojirenstvi/UdS-5pr.pdf>
- [3] BOLZANO, B.: *Technická příručka* [online]. c1998-2004, [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <<http://prirucka.bolzano.cz/>>
- [4] ČABELKA, J. a kol.: *Mechanická technológia*. Bratislava: VSAV, 1967. 1034 s.
- [5] ČERNÝ, V.: *Indukční ohřev* [online]. c2007, [cit. 2011-20-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.4-construction.com/cz/clanek/indukcni-ohrev-1/>>
- [6] HENZEL, A. – SPITTEL, T.: *Rasčet energosilových parametrov v processach obrabotky metallov davleniem: Spravočnik*. Moskva: Metallurgija, 1982. 359 s.
- [7] HRUBÝ, J.: *Metoda konečných prvků: panel 1*. [online]. [cit. cit. 2011-20-05]. Dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pdf>
- [8] JINPO PLUS.: *Ohyby*. [online]. [cit. 2011-20-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.jinpo-plus.cz/cs/produkty/ohyby>>
- [9] KŘÍŽ, R. – TRČKA, J.: *Tabulky materiálů pro strojírenství: 1. část kovové materiály – železné kovy*. Ostrava: Montanex, 1999. 349 s. ISBN 80-85780-92-5
- [10] LI, W. – YAO, Y. L.: *Laser Bending of Tubes: Mechanism, Analysis, and Prediction*. Journal of Manufacturing Science and Engineering. November 2001, vol.123, s. 674-981, Dostupné také z WWW: <<http://www.columbia.edu/cu/mechanical/mrl/Li4.pdf>>. ISSN 1087-1357
- [11] OMNI-X.: *Omni-X Tube Bending Guide* [online]. c2009, [cit. 2011-20-05]. Dostupné z WWW: <<http://69.15.95.27>>
- [12] PETRUŽELKA, J. – BŘEZINA, R.: *Úvod do tváření I*. Ostrava: VŠB-TUO, 1991, 157 s. ISBN 80-7078-878-1
- [13] PETRUŽELKA, J. – HRUBÝ, J.: *Strojírenské tváření I*. Ostrava: VŠB-TUO, 1992, 152 s. ISBN 80-7078-878-X
- [14] QForm 2D/3D, [počítačový program]. ver. 5.1.1.0621. Moscow (Russia): QuantorForm Ltd., [1998-2011]. Software pro simulaci tváření.

- [15] RillFEM.: *Indukční ohřevy* [online]. c2011, [cit. 2011-20-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.rillfem.com/>>
- [16] SEMIATIN, S. L. a kol.: *Metals Handbook Ninth Edition. Vol. 14, Forming and Forging*. Ohio, Metals Park: ASM International, 1998, 978 s. ISBN 0-87170-020-4.
- [17] STANGE, R.: *Basic tube bending guide*. Denver: Tool for bending, Inc., 1963. 1036 s.
- [18] *Tube and Pipe Bending Manual* [online]. c2009, [cit. 2011-20-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.toolsforbending.com/literature.asp>>
- [19] VÍTEK, A.: *Ohýbání trubek*. Praha: SNTL, 1966. 159 s.
- [20] VLACHOVÁ, M.: *Techmania – Edutorium: Fyzika v pozadí* [online]. c2008, [cit. 2011-20-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.techmania.cz/edutorium>>

8 Přílohy

- CD s elektronickou verzí této práce.